

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Kompenzace jalové energie
Reactive Power Compensation

2016

Ondřej Křemen

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student:

Ondřej Křemen

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907R001 Elektroenergetika

Téma:

Kompenzace jalové energie
Reactive Power Compensation

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky kompenzace jalové energie
2. Možnosti technického řešení kompenzace
3. Ukázka návrhu kompenzace

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Hradílek Z.: Elektroenergetika distribučních a průmyslových sítí, VŠB-TUO, Ostrava, 2008
2. Další literatura podle pokynů vedoucího bakalářské práce

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Petr Krejčí, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

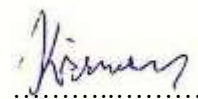


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: *20. dubna 2016*



.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Petru Krejčímu, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce. Také bych rád poděkoval mé rodině a přítelkyni, že mě po celou dobu studia podporovali.

Abstrakt

Táto bakalárská práca sa zaoberá problematikou kompenzace jalové energie. Je v ní dôkladne popísané základné chovanie obvodu a prostriedky pro zlepšovani účinníku a tím snížování ztrát a nákladů. Dále je úkolem této práce seznámit se s technickými prostředky kompenzace v praxi a vytvořit vlastní návrh skupinové kompenzace v průmyslové síti.

Klíčová slova

Kompenzace jalového výkonu, jalový výkon, účinník, kompenzace, kompenzační kondenzátory, regulace, hrazená kompenzace, hradící tlumivky, spínání;

Abstract

This thesis deals with reactive power compensation. It elaborates the basic behavior of the circuit and instruments for improving power factor, thus reducing losses and costs. This thesis also focuses on getting acquainted with the technical means of compensation in practice and creating the proposal of compensation in industrial networks.

Key words

Reactive Power Compensation, Reactive Power, Power factor, Compensation, Compensation Capacitors, regulation, detuned reactive power compensation, detuned reactors, switching;

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
ω	$rad \cdot s^{-1}$	Úhlová rychlost
$u(t)$	V	Okamžité napětí
$i(t)$	A	Okamžitý proud
p_1, p_2	W	Okamžitý výkon
U_m	V	Amplituda napětí
I_m	A	Amplituda proudu
R	Ω	Odpor
L	H	Indukčnost
C	F	Kapacita
X_L	Ω	Induktivní reaktance
X_C	Ω	Kapacitní reaktance
U	V	Napětí
I	A	Proud
P	W	Činný výkon
Q	var	Jalový výkon
S	VA	Zdánlivý výkon
D	VA	Deformační výkon
$\cos\varphi$	-	Účíník
λ	-	Skutečný účíník
I_j	A	Jalový proud
$I_{\check{c}}$	A	Činný proud
I_k	A	Kompenzační proud
Q_k	var	Kompenzační výkon
U_f	V	Fázové napětí
U_s	V	Sdružené napětí
ΔU	V	Úbytek napětí

ΔP	W	Ztráty
f	Hz	Frekvence
f_r	Hz	Rezonanční frekvence
p	-	Činitel ztlumení
Z	Ω	Impedance
R_k	Ω/km	Rezistence vedení
X_k	Ω/km	Reaktance vedení
k	-	Koeficient kompenzace
HDO	-	Hromadné dálkové ovládání
NN	-	Nízké napětí
VN	-	Vysoké napětí
VVN	-	Velmi vysoké napětí

Obsah

Úvod.....	- 11 -
1 TEORIE OBVODŮ.....	- 12 -
1.1 IDEÁLNÍ PRVKY VE STŘÍDAVÝCH OBVODECH	- 12 -
1.1.1 Ohmická zátěž ve střídavých obvodech:	- 12 -
1.1.2 Kapacitní zátěž ve střídavých obvodech:	- 13 -
1.1.3 Induktivní zátěž ve střídavých obvodech:	- 14 -
1.2 VÝKONY VE STŘÍDAVÝCH OBVODECH	- 15 -
1.2.1 Zdánlivý výkon:	- 16 -
1.2.2 Účinník:	- 16 -
1.2.3 Deformační výkon:	- 17 -
1.2.4 Skutečný účinník:	- 18 -
1.3 DŮVODY KOMPENZACE	- 19 -
1.3.1 Technické důvody:	- 19 -
1.3.2 Ekonomické důvody:	- 19 -
2 ZÁKLADY KOMPENZACE.....	- 21 -
2.1 PRINCIP KOMPENZACE	- 21 -
2.1.1 Sériová kompenzace:	- 23 -
2.1.2 Paralelní kompenzace:	- 24 -
3 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ KOMPENZACE.....	- 26 -
3.1 ZPŮSOB ZAPOJENÍ PARALELNÍ KOMPENZACE.....	- 26 -
3.1.1 Individuální kompenzace:	- 26 -
3.1.2 Skupinová kompenzace:	- 27 -
3.1.3 Centrální kompenzace:	- 27 -
3.1.4 Kombinovaná kompenzace:	- 27 -
3.2 ROZDĚLENÍ KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ.....	- 28 -
3.2.1 Rotační kompenzační zařízení:	- 28 -
3.2.2 Statické kompenzátory:	- 29 -
3.3 CHRÁNĚNÁ KOMPENZACE	- 31 -
3.3.1 Chráněná kompenzační sekce:	- 32 -

3.3.2	<i>Kompenzační filtry:</i>	- 35 -
3.4	ŘÍZENÁ KOMPENZACE	- 36 -
3.4.1	<i>Regulátor jalového výkonu:</i>	- 36 -
3.4.2	<i>Stupňovitě řízená kompenzace:</i>	- 37 -
3.4.3	<i>Plynule řízená kompenzace - Pasivní:</i>	- 39 -
3.4.4	<i>Plynule řízená kompenzace - Aktivní:</i>	- 40 -
4	PŘÍKLAD VÝPOČTU KOMPENZOVANÉ SÍTĚ	- 43 -
4.1	TEORETICKÁ UKÁZKA KOMPENZOVANÉ SÍTĚ	- 43 -
4.2	VLASTNÍ NÁVRH KOMPENZACE	- 45 -
4.2.1	<i>Zadání:</i>	- 45 -
4.2.2	<i>Návrh kompenzace pro okruh 0,4 kV:</i>	- 45 -
	Závěr	- 53 -
	Použitá literatura	- 54 -
	Seznam obrázků	- 55 -
	Seznam tabulek	- 56 -

Úvod

Kompenzace jalové energie je jeden ze způsobů jak zlepšit kvalitu elektrické energie, což vede ke snížení nákladů na provoz a spotřebu elektrické energie. U kompenzace jalové energie je snahou aby spotřebiče jalového výkonu, především v průmyslu, neodebíraly jalový výkon ze sítě. Důvodem tohoto procesu je, že odebíraný jalový výkon nekoná činnou práci, je tedy nevyužit, zvětšuje proud a tím i ztráty v síti.

V první části bakalářské práce jsou vysvětleny hlavní parametry ovlivňující střídavé obvody a chování proudu v obvodech s ideálními pasivními prvky. Dále jsou v této části odvozeny výkony a vysvětlena jejich souvislost s charakterem obvodu. Dále jsou zde popsány pojmy, jako jsou účinník, který kompenzujeme na určitou hodnotu, a deformační (skutečný) účinník, který se vyskytuje v nekvalitních sítích vlivem moderních spotřebičů. V posledních bodech této části jsou vysvětleny hlavní důvody, proč kompenzujeme.

Další část bakalářské práce se zabývá samotným principem kompenzace a rozdílem mezi sériovou a paralelní kompenzací. Jsou zde základní vztahy pro výpočty a vektorové diagramy, ze kterých je zřejmý rozdíl před a po kompenzaci.

Třetí část této práce se zabývá technickými prostředky kompenzace v praxi. Jsou zde uvedeny základní druhy kompenzátoru a rozdělení podle způsobu připojení ke spotřebiči. Dále je zde popsáno samotné řízení kompenzačního výkonu a způsoby kompenzace v sítích, kde se vyskytují vyšší harmonické a jiné rušivé elementy.

Poslední kapitola je rozdělena do dvou částí, ve kterých jsou názorné ukázky kompenzace jalového výkonu. V první části je vypočten kompenzační výkon pro kompenzaci teoretické sítě na ideální účinník $\cos\varphi = 1$. Dále jsou zde vypočteny ztráty a úbytek napětí před a po kompenzaci, které názorně poukazují na hlavní rozdíly sítě bez kompenzace a sítě, která je již kompenzována. Druhá část této kapitoly se zabývá skutečným návrhem průmyslové sítě, která byla vytvořena jen pro názornou ukázku u této bakalářské práce. Je zde vypočten potřebný kompenzační výkon pro kompenzaci na účinník $\cos\varphi = 0,98$ a navržen samotný kompenzační rozvaděč se všemi potřebnými komponenty, které jsou dále vybrány z katalogu skutečných výrobců kompenzačních přístrojů.

1 TEORIE OBVODŮ

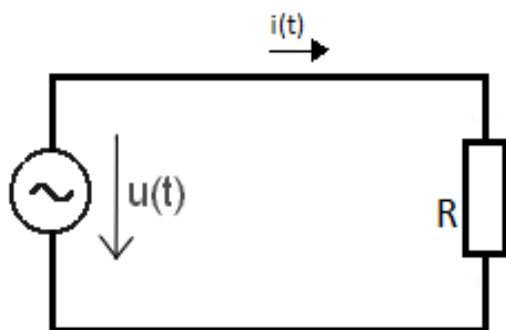
Abychom mohli pochopit kompenzaci jalové energie a důvody její realizace, musíme se nejprve seznámit se základními znalostmi střídavých obvodů.

V této části se pro pochopení látky budou uvažovat obvody s ideálními prvky, tedy prvky, které mají jenom jeden parametr. Kombinace těchto prvků poté tvoří reálný obvod.

1.1 IDEÁLNÍ PRVKY VE STŘÍDAVÝCH OBVODECH

Každý elektrický obvod je tvořen v ideálním případě zátěží čistě ohmického, kapacitního nebo induktivního charakteru.

1.1.1 Ohmická zátěž ve střídavých obvodech:



Okamžitá hodnota napětí:

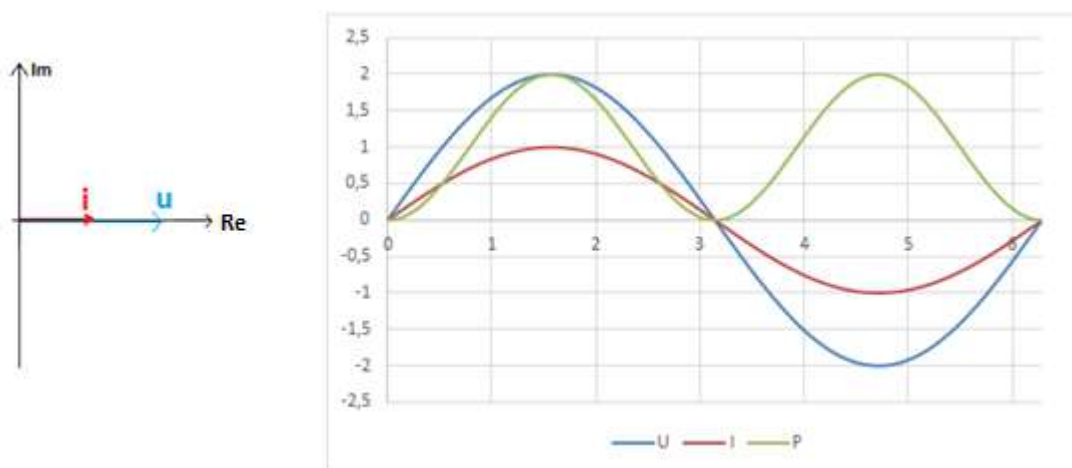
$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t) \quad (1.1)$$

Okamžitá hodnota proudu:

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} = \frac{U_m \cdot \sin(\omega t)}{R} = I_m \cdot \sin(\omega t) \quad (1.2)$$

Obrázek 1: Rezistor ve střídavém obvodu.

Ze vztahu pro okamžitou hodnotu proudu a napětí je patrné, že jejich časový průběh je shodný. To znamená, že proud, který protéká obvodem s čistě ohmickou zátěží, je ve fázi s napětím. Fázový posun je tedy nulový. [1]



Obrázek 2: Fázorový diagram a průběh napětí, proudu a výkonu ohmické zátěže.

Okamžitý výkon v tomto případě mění svou okamžitou hodnotu dvojnásobně od svého původního kmitočtu ω . Tato hodnota je vždy kladná a říkáme, že je to okamžitý činný výkon. Vypočte se ze vztahu:

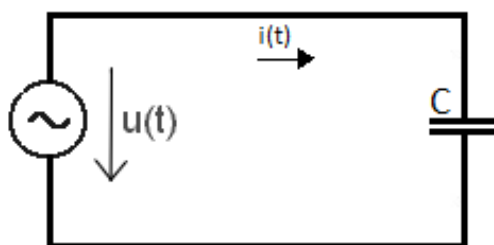
$$p_1 = P \cdot (1 - \cos 2\omega t) \quad (1.3)$$

kde P je střední hodnota okamžitého výkonu, která se vypočte z:

$$P = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos \varphi \quad [W] \quad (1.4)$$

Tento výkon se může měnit na jiný výkon, a to například tepelný nebo mechanický výkon. Mluvíme tedy o výkonu, který koná činnou práci. Proto jej nazýváme **ČINNÝ VÝKON**.

1.1.2 Kapacitní zátěž ve střídavých obvodech:



Z charakteristické rovnice pro kondenzátor:

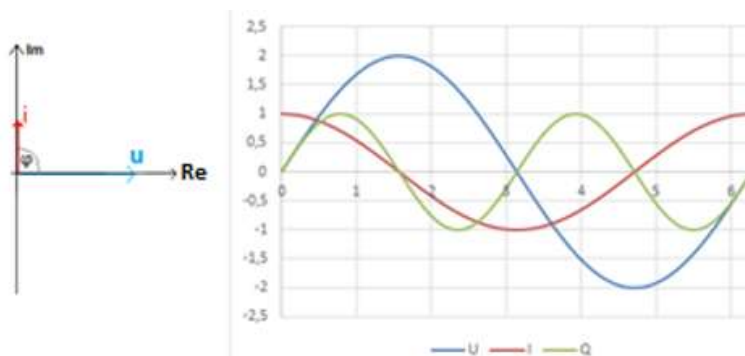
$$Q(t) = C \cdot u(t) \quad (1.5)$$

můžeme určit změnu ekvivalentní velikosti proudu:

$$i(t) = \frac{\Delta Q(t)}{\Delta t} \quad (1.6)$$

Obrázek 3: Kondenzátor ve střídavém obvodu.

Ze vztahu pro ekvivalentní velikost proudu je zřejmé, že proud je největší v okamžiku, kdy je nejrychlejší změna napětí, což je tehdy, když napětí prochází nulou. Tomuto stavu odpovídá nabíjení kondenzátoru. Naopak nejmenší proud je v okamžiku, kdy je tato změna napětí nejpomalejší, tedy když je kondenzátor nabit. V tomto okamžiku je změna napětí nulová a proud je tedy také nulový. Při vybíjení kondenzátoru je proud v opačném směru a jeho velikost bude zase největší, když bude napětí procházet nulou. Z toho vyplývá, že proud předbíhá napětí o $\frac{\pi}{2}$, fázor proudu je tedy od napětí posunut o 90° . [1]



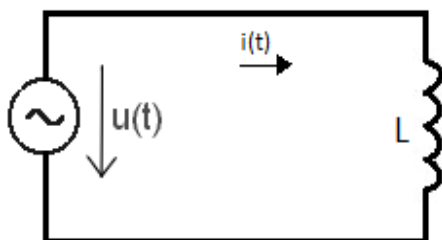
Obrázek 4: Fázorový diagram a průběh napětí, proudu a výkonu kapacitní zátěže.

Okamžitá hodnota proudu je:

$$i(t) = I_m \cdot \cos(\omega t + \varphi) = I_m \cdot \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \frac{U_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)}{X_c} \quad (1.7)$$

kde X_c je Kapacitní reaktance.

1.1.3 Induktivní zátěž ve střídavých obvodech:

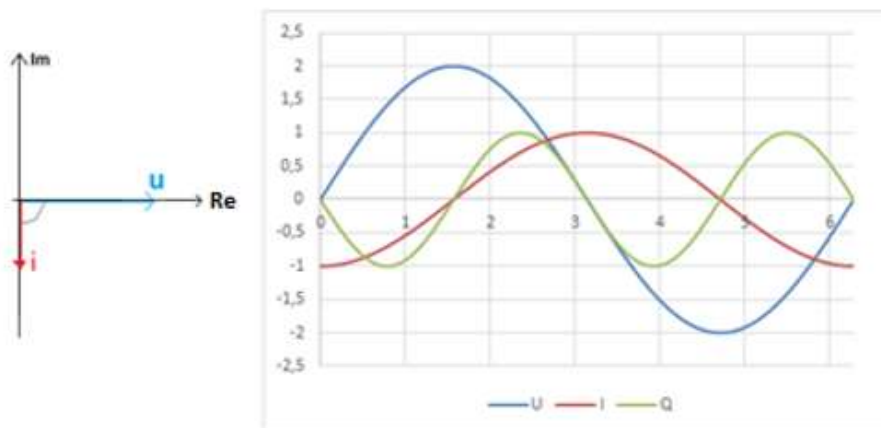


Proud protékající cívkou, který s časem mění směr, vytváří časově proměnlivý magnetický tok. Podle Faradayova zákona se v takové cívce indukuje napětí:

$$u = \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (1.8)$$

Obrázek 5: Cívka ve střídavém obvodu.

Indukované napětí bude mít největší velikost při nejrychlejší změně proudu. Tomu odpovídá stav, kdy průběh proudu prochází nulou. A naopak v okamžiku, kdy proud je maximální, jeho změna je nulová a napětí je tedy také nulové. Z toho vyplývá, že napětí je časově posunuté oproti proudu, a to o $\frac{\pi}{2}$. Fázor proudu je tedy od napětí pootočen o 90° v opačném směru než u kondenzátoru. [1]



Obrázek 6: Fázorový diagram a průběh napětí, proudu a výkonu kapacitní zátěže.

Okamžitá hodnota napětí je:

$$u = U_m \cdot \cos(\omega t) = i(t) \cdot X_L = I_m \cdot \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \cdot X_L = I_m \cdot \sin(\omega t) \cdot X_L \quad (1.9)$$

kde X_L je Induktivní reaktance.

Okamžitý výkon v případě kapacitoru a induktoru mění svou hodnotu dvojnásobně od svého původního kmitočtu. Může nabývat jak kladné, tak i záporné hodnoty a nazývá se okamžitý jalový výkon. Vypočte se ze vztahu:

$$p_2 = Q \cdot \sin(2\omega t) \quad (1.10)$$

kde Q je amplituda okamžitého jalového výkonu, která se vypočte z:

$$Q = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \sin(\varphi) \quad [var] \quad (1.11)$$

Střední hodnota okamžitého jalového výkonu je nulová, což znamená, že výkon, který zdroj dodává je vrácen zpět a to se děje 2x za periodu. Tento výkon nazýváme JALOVÝ VÝKON a říkáme, že je tento výkon neužitečný. Přelévá se totiž jen mezi zdrojem a spotřebičem, ale z výše uvedených poznatků je zřejmé, že je potřebný k vytvoření elektrického a magnetického pole. [1]

1.2 VÝKONY VE STŘÍDAVÝCH OBVODECH

V předchozích bodech je naznačeno, jak jednotlivé charakteristiky lineárních prvků mění fázový posun proudu a tím charakter výkonů.

Z předchozích poznatků je patrné, že ČINNÝ VÝKON je charakteristický tím, že napětí je ve fázi s proudem a tento výkon je přeměňován v jiné výkony, například v mechanický či tepelný. Koná tedy užitečnou práci. Tento výkon se vypočte ze vztahu pro 3. fázovou soustavu:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi) = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{\xi} \quad [W] \quad (1.12)$$

Dále je patrné, že JALOVÝ VÝKON se vyskytuje, všude kde je přítomnost indukčnosti nebo kapacity. Je charakteristický, tím, že u jalového výkonu kapacitního charakteru, proud předbíhá napětí o $\frac{\pi}{2}$ a u jalového výkonu induktivního charakteru je proud zpožděn za napětím o $\frac{\pi}{2}$. Tento výkon nekoná užitečnou práci. Vypočte se ze vztahu pro 3. fázovou soustavu: [2]

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin(\varphi) = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_j \quad [var] \quad (1.13)$$

V dalších bodech se seznámíme se zdánlivým výkonem, účínkem a výkonem v obvodech s výskytem vyšších harmonických.

1.2.1 Zdánlivý výkon:

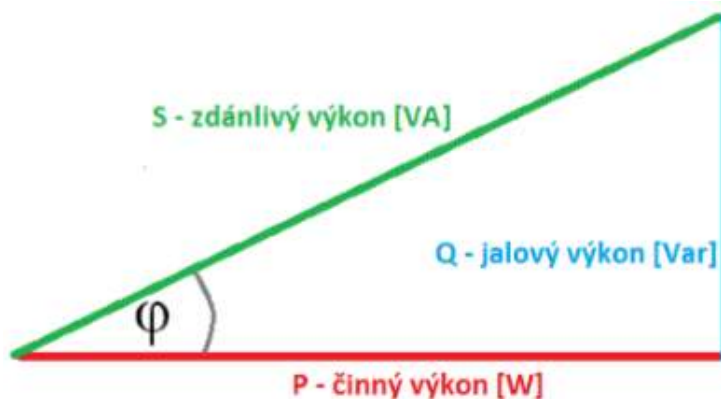
Z praktických důvodů byl zaveden pojem Zdánlivý výkon se značkou S . Je to součet maximální možné hodnoty činného výkonu P , což v ideálním případě nastává, když je proud ve fázi s napětím, tedy úhel fázového posunu $\varphi = 0$ a maximální hodnota jalového výkonu Q , což nastává, když je $\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$.

Z toho vyplývá, že Zdánlivý výkon je součet těchto výkonů a tedy celkový přenášený výkon mezi zdrojem a spotřebičem. [2]

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \rightarrow U_{eff} \cdot I_{eff} \quad [VA; W; var] \quad (1.14)$$

Součtem vektorů Činného a Jalového výkonu lze vyjádřit fázor Zdánlivého výkonu, který je zobrazen v Trojúhelníku výkonů:

$$\hat{S} = P + jQ \quad (1.15)$$



Obrázek 7: Trojúhelník výkonů.

1.2.2 Účinník:

Touto veličinou se může zhodnotit kvalita elektrické energie ze sítě, tedy jak velkou část zdánlivého výkonu tvoří činný výkon, který koná užitečnou práci.

Účinník je mírou podílu činného a zdánlivého výkonu:

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} \quad [-] \quad (1.16)$$

Z rovnic pro činný a jalový výkon je zřejmé, že největší hodnota činného výkonu se dosáhne při $\cos(\varphi) = 1$, tedy pro nulový fázový posun. V tomto případě by byla jalová složka nulová. To však prakticky není možné, a proto se této hodnotě snažíme alespoň přiblížit. [2][4]

Podle české normy musíme mít účinník $\cos(\varphi) \geq 0,95$.

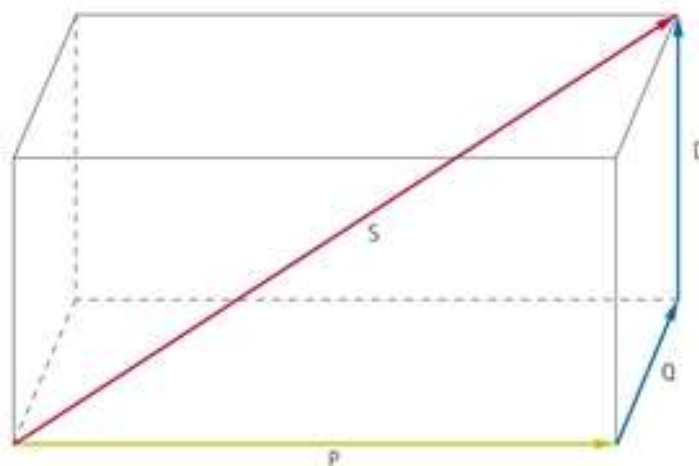
Účinník je závislý na fázovém posunu mezi napětím a proudem. Pokud má zátěž induktivní charakter, proud se zpožďuje o -90° za napětím. Pokud má kapacitní charakter, proud předbíhá napětí o $+90^\circ$. Výsledný proud je rozdíl těchto proudů, a tedy výsledný jalový výkon je rozdílem kapacitního a induktivního jalového výkonu. [2][4]

1.2.3 Deformační výkon:

V předchozích bodech se uvažoval průběh základní harmonické. S rozvojem moderní polovodičové techniky se v obvodech začal objevovat vyšší počet nelineárních prvků, které negativně ovlivňují napájecí proud. V síti se poté mimo základní harmonické (50Hz) vyskytují harmonické proudy, jejichž frekvence je násobkem základního kmitočtu. [4]

Zdánlivý výkon je pak tvořen nejen činným a jalovým výkonem 1. harmonické, ale i výkonem deformačním:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad [VA; W; var; VA] \quad (1.17)$$



Obrázek 8: Zdánlivý výkon v obvodech s vyššími harmonickými.

Tento deformační výkon se vypočte ze vztahu:

$$D = U_n \cdot I_n \quad [VA] \quad (1.18)$$

kde napětí U_n a proud I_n jsou napětí nebo proud vyšších harmonických.

Napětí a proud při výskytu vyšších harmonických se vyjadřují ze vztahů:

$$U_n = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2} \quad [V] \quad (1.19)$$

$$I_n = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} I_k^2} \quad [A] \quad (1.20)$$

kde u_n a i_n jsou napětí a proudy jednotlivých harmonických složek po rozkladu na Furierovu řadu.

To samé potom platí i pro činný a jalový výkon:

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} P_n = P_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \cos(\varphi_n) \quad [W] \quad (1.21)$$

$$Q = \sum_{n=0}^{\infty} Q_n = \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \sin(\varphi_n) \quad [var] \quad (1.22)$$

kde P_0 je stejnosměrná složka činného výkonu a P_n nebo Q_n jsou n -té harmonické těchto výkonů.

1.2.4 Skutečný účinník:

V obvodech, kde se vyskytují vyšší harmonické, nemůžeme uvažovat účinník $\cos(\varphi)$, ale účinník skutečný λ , který zahrnuje tyto složky. Tento skutečný účinník se vypočte ze vztahu:

$$\lambda = \frac{P}{S} \rightarrow \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (1.23)$$

Jelikož tento účinník není stejný jako $\cos(\varphi)$, který kompenzujeme k hodnotě $\varphi=1$, nikoliv $\lambda=1$, proto musíme před kompenzací tyto vyšší harmonické vyfiltrovat. [4][7]

1.3 DŮVODY KOMPENZACE

Kompensace neboli zlepšování účinníku se provádí ze dvou hlavních důvodů, a to technických nebo ekonomických. Účinek kompenzace se projeví vždy jen v napájecí části elektrické sítě. Za místem připojení směrem ke spotřebiči se na napájecích poměrech nic nemění.

V následujících bodech se budu těmito důvody zabývat.

1.3.1 Technické důvody:

- Zavedením kompenzátoru do sítě snížíme odebíraný zdánlivý výkon a proud, což vede k snížení ztrát a celkovému odlehčení vedení.

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot I^2 = 3 \cdot R \cdot I^2 \cdot \cos^2(\varphi) + 3 \cdot R \cdot I^2 \cdot \sin^2(\varphi) \quad [W] \quad (1.24)$$

- Snížení úbytků v rozvodu elektrické energie.
(Zmenšuje kolísání napětí v elektrizační soustavě.)
- Zmenšení pořizovacích nákladů na spotřebiče a dimenzování vodičů.
(Spotřebiče i vodiče se dimenzují na proud zdánlivý, který je vektorový součet činného a jalového proudu.)

$$I = \sqrt{I_c^2 + I_j^2} \quad [A] \quad (1.25)$$

- Zvětší se přenášený činný výkon, a tím účinnost elektrizační soustavy.

[2][3]

1.3.2 Ekonomické důvody:

Všechny předchozí důvody rovněž patří i pod ty ekonomické, ale největším ekonomickým důvodem jsou finanční pokuty pro odběratele se špatným účinníkem.

Každý odběratel elektrické energie je povinen kompenzovat elektrické zařízení, které mají účinník jiný než $\cos(\varphi) = 0,95 \rightarrow \cos(\varphi) = 1$. Vyžadují to tyto legislativní dokumenty:

- Energetický zákon (Zákon č. 222/1994 Sb.) § 15 odst. 4 písm. b),
- Vyhláška Ministerstva průmyslu a obchodu č. 169/1995 Sb. § 6 odst. 2 písm. a),
- Ceník elektrické energie schválený Výměrem Ministerstva financí České republiky č. 01/98. [2][3][4][8][9][10]

Kromě toho dává Zákon č. 222/1994 Sb. ve svém § 39 pravomoc Státní energetické inspekci (SEI) vyměřit odběratelům, kteří nedodržují podmínky uvedené v jeho § 15, pokutu až do výše 50 milionů korun.

Kontroly účinníku jsou vystaveni pouze průmysloví odběratelé, kteří se řadí do těchto skupin:

- A - odběr z distribuční soustavy se sdruženým napětím vyšším než 50kV.
- B - odběr z distribuční soustavy se sdruženým napětím od 1kV do 50KV včetně.
- C - odběr z distribuční soustavy se sdruženým napětím do 1kV včetně, pokud neslouží k uspokojení osobních potřeb.

Cenové přírázky za nedodržení účinníku jsou pro jednotlivé odběratele stanoveny podle typu sazby a jsou uvedeny v procentech platby za výkon a elektrickou energii. [2][3][4][8][9][10]

Tabulka 1: Cenové přírázky za nedodržení předepsané úrovně $\cos \varphi$:

Rozsah $\text{tg}(\varphi) \left[\frac{\text{kVarh}}{\text{kWh}} \right]$	$\cos(\varphi)$	Přírázka %	Rozsah $\text{tg}(\varphi) \left[\frac{\text{kVarh}}{\text{kWh}} \right]$	$\cos(\varphi)$	Přírázka %
0,311 - 0,346	0,95	-	1,008 - 1,034	0,70	37,59
0,347 - 0,379	0,94	1,12	1,035 - 1,063	0,69	39,66
0,380 - 0,410	0,93	2,26	1,064 - 1,092	0,68	41,80
0,411 - 0,440	0,92	3,43	1,093 - 1,123	0,67	43,99
0,441 - 0,470	0,91	4,63	1,124 - 1,153	0,66	46,25
0,471 - 0,498	0,90	5,85	1,154 - 1,185	0,65	48,58
0,499 - 0,526	0,89	7,10	1,186 - 1,216	0,64	50,99
0,527 - 0,553	0,88	8,37	1,217 - 1,249	0,63	53,47
0,554 - 0,580	0,87	9,68	1,250 - 1,281	0,62	56,03
0,581 - 0,606	0,86	11,02	1,282 - 1,316	0,61	58,67
0,607 - 0,632	0,85	12,38	1,317 - 1,350	0,60	61,40
0,633 - 0,659	0,84	13,79	1,351 - 1,386	0,59	64,23
0,660 - 0,685	0,83	15,22	1,387 - 1,423	0,58	67,15
0,686 - 0,710	0,82	16,69	1,424 - 1,460	0,57	70,18
0,711 - 0,736	0,81	18,19	1,461 - 1,494	0,56	73,31
0,737 - 0,763	0,80	19,74	1,495 - 1,532	0,55	76,56
0,764 - 0,789	0,79	21,32	1,533 - 1,579	0,54	79,92
0,790 - 0,815	0,78	22,94	1,580 - 1,620	0,53	83,42
0,816 - 0,841	0,77	24,61	1,621 - 1,663	0,52	87,05
0,842 - 0,868	0,76	26,32	1,664 - 1,709	0,51	90,82
0,869 - 0,895	0,75	28,07	1,710 - 1,755	0,50	94,70
0,896 - 0,922	0,74	29,87	Vyšší než 1,755	Nižší než 0,50	100
0,923 - 0,949	0,73	31,72			
0,950 - 0,977	0,72	33,63			
0,978 - 1,007	0,71	35,58			

Zároveň s těmito přírážkami dává distributor elektrické energie možnost účtovat si překompenzování sítě tak, že odběratel bude do sítě dodávat jalový výkon kapacitního charakteru. Za každou takto dodanou Mvarh je účtováno v současné době 400 Kč. [3][10]

2 ZÁKLADY KOMPENZACE

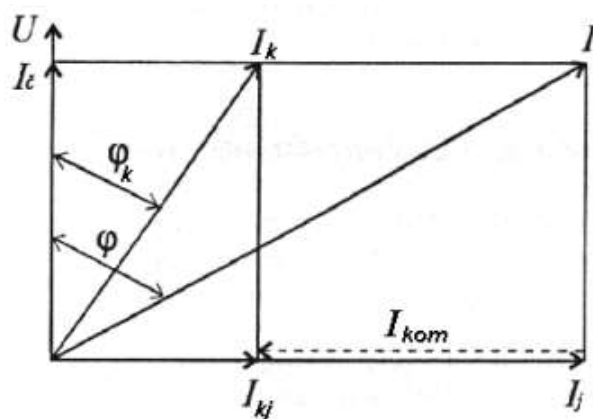
Dále se budu zabývat samotnou kompenzací. Budou zde naznačeny hlavní principy a základní zapojení obvodu s kompenzátozem.

2.1 PRINCIP KOMPENZACE

V elektrických obvodech se setkáváme s řadami spotřebičů elektrické energie. Tyto elektrické spotřebiče dělíme podle toho, jaký charakter proudu odebírají:

- Jsou to spotřebiče, které mají čistě činný charakter, mezi které se řadí například žárovky, vařiče a sporáky s topnou spirálou a další zařízení, které přeměňují elektrickou energii na tepelnou.
- Další velkou skupinou jsou spotřebiče, které potřebují ke svému chodu magnetické pole, které odklání fázor proudu od napětí. Jsou to spotřebiče induktivního charakteru a patří mezi ně např. transformátory, elektromotory, indukční pece, svářečky a další elektrické zařízení, které využívají elektromagnetickou indukci.
- Poslední skupinou jsou spotřebiče kapacitního charakteru. Tato skupina spotřebičů využívá ke svému chodu elektrické pole, které odklání fázor proudu od napětí v opačném směru než u spotřebiče induktivního charakteru. Jsou to např. kondenzátory nebo dlouhé vedené VVN či vedení trakční dopravy, u kterých je toto pole vytvořené nadbytečně, ve velkém měřítku.

Z předchozí kapitoly je zřejmé, že fázor ideálního induktivního proudu je opačný než fázor ideálního kapacitního proudu, a toho se u kompenzace jalové energie využívá. Tedy, když chceme zmenšit jalový proud induktivního charakteru a tedy i jalový výkon, který je násobek napětí, proudu a fázového posunu, musíme do obvodu zařadit kondenzátor, který má fázor proudu opačný. Tím se tyto proudy odečtou a celkový zdánlivý proud i jalový výkon jsou menší. Tento kompenzátor se zapojuje co nejbližší ke spotřebiči a kompenzuje síť směrem ke zdroji. Parametry vedení za kompenzátozem ke spotřebiči jsou neměnné. [2][3]



Obrázek 9: Fázorový diagram před a po kompenzaci.

Z obrázku 9 je zřejmé, že zdánlivý (celkový) proud, na který jsou spotřebiče dimenzovány, se skládá jak z činné složky, tak i jalové složky proudu. Proto se snažíme tento proud zmenšit a to tak, že snížíme jednu ze složek proudu. Činná složka proudu se dá měnit jen mechanicky, a proto kompenzujeme jalovou složku. Zařazením kompenzátoru do obvodu, který má fázor proudu opačného směru, se tyto proudy odečtou a zmenší se celkový proud po kompenzaci, účinník a jalový výkon. [2][3]

Činná a Jalová složka proudu:

$$I_{\xi} = I \cdot \cos(\varphi) = I_k \cdot \cos(\varphi_k) \quad [A] \quad (2.1)$$

$$I_j = I \cdot \sin(\varphi) = I_k \cdot \sin(\varphi_k) \quad [A] \quad (2.2)$$

Celková velikost zdánlivého proudu po kompenzaci je tedy:

$$I_k = I \cdot \frac{\cos(\varphi)}{\cos(\varphi_k)} \quad [A] \quad (2.3)$$

Účinník:

$$\cos(\varphi) = \frac{I_{\xi}}{I} = \frac{P}{S} \quad [-] \quad (2.4)$$

Činný, Jalový a Zdánlivý výkon:

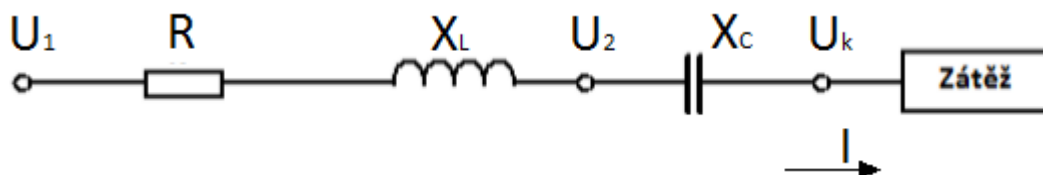
$$P = S \cdot \cos(\varphi) = U_f \cdot I \cdot \cos(\varphi) = U_f \cdot I_{\xi} \quad [W] \quad (2.5)$$

$$Q = S \cdot \sin(\varphi) = U_f \cdot I \cdot \sin(\varphi) = U_f \cdot I_j \quad [\text{var}] \quad (2.6)$$

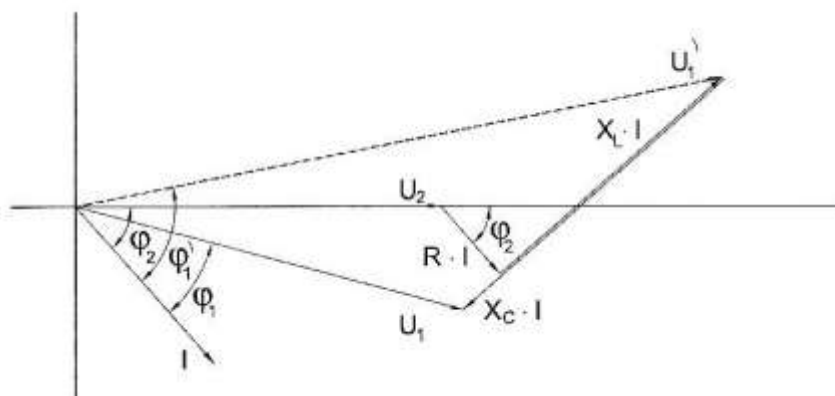
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = U_f \cdot I \quad [VA] \quad (2.7)$$

2.1.1 Sériová kompenzace:

U této kompenzace je kompenzátor zapojen v sérii mezi zdrojem a spotřebičem. Napětí a výkon na kondenzátoru se tedy mění se zatížením. Toto napětí se mění úměrně s velikostí proudu, proto se uplatňují v sítích do 35 kV u dlouhých vedení VN a VVN, kde kompenzují především podélnou impedanci a tím snižují úbytek napětí na vedení. Nevýhodou této kompenzace je, že nemůžeme omezit zkratové proudy a nadproudy, při kterých vzniká přepětí. [3]



Obrázek 10: Schéma zapojení sériové kompenzace do střídavé sítě.



Obrázek 11: Fázorový diagram sériové kompenzace.

Z fázorového diagramu můžeme odvodit vztah pro úbytek napětí:

$$\Delta \hat{U} = \hat{U}_1 \cdot \hat{U}_2 = [R + j(X_L - X_C)] \cdot (I \cdot \cos(\varphi) - jI \cdot \sin(\varphi)) \quad [V] \quad (2.8)$$

Pro jeho reálnou složku obvodu s kompenzátozem potom platí vztah:

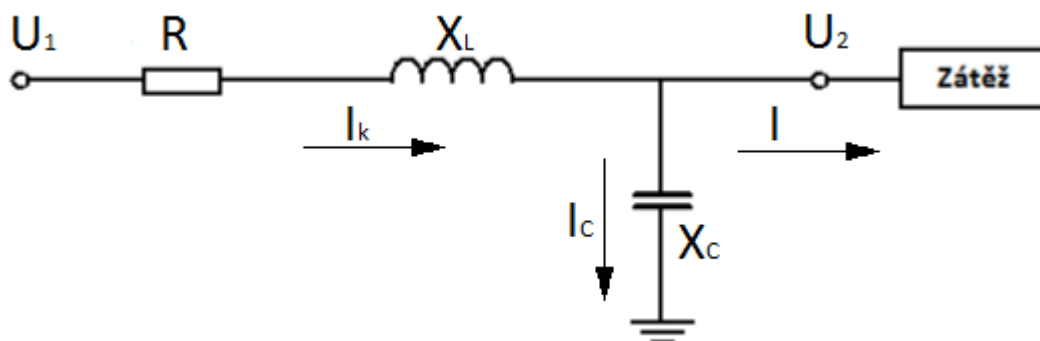
$$\Delta U = R \cdot I \cdot \cos(\varphi) + (X_L - X_C) \cdot I \cdot \sin(\varphi) \quad [V] \quad (2.9)$$

Napětí za kompenzátozem:

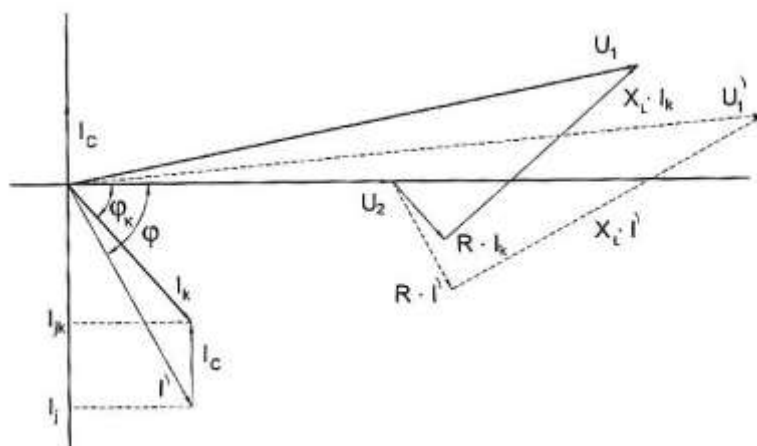
$$U = U_2 + X_C \cdot I \cdot \sin(\varphi) \quad [V] \quad (2.10)$$

2.1.2 Paralelní kompenzace:

Tato kompenzace na rozdíl od sériové, která kompenzuje napětí, kompenzuje jalový výkon a proto je nejrozšířenější. Připojením kompenzátoru paralelně ke spotřebiči se změní fázor proudu a tedy přenášené ztráty. [3]



Obrázek 12: Schéma zapojení paralelní kompenzace do střídavé sítě.



Obrázek 13: Fázorový diagram paralelní kompenzace.

Z fázorového diagramu pro paralelní kompenzaci je zřejmé, že proud I , který je odebíráán ze sítě před kompenzací je větší než proud I_k , který je odebíráán po kompenzací. Výsledný proud po kompenzací I_k se potom vypočte ze vztahu:

$$\hat{I}_k = \hat{I}' + \hat{I}_c \quad [A] \quad (2.11)$$

Pokud předpokládáme, že činný výkon zůstane stejný, změní se pouze fázový posun z hodnoty φ na φ_k a koeficient kompenzace, který udává poměr mezi jalovými složkami před a po kompenzací, bude stejný jako tangenty těchto úhlů:

$$k = \frac{I_{jk}}{I} = \frac{\operatorname{tg}(\varphi_k)}{\operatorname{tg}(\varphi)} \quad (2.12)$$

Výkon kondenzátoru potřebný ke změně fázového posunu na novou hodnotu:

$$Q_C = U \cdot I_C = U_2 \cdot \omega \cdot C = P \cdot [tg(\varphi) - tg(\varphi_k)] \quad [\text{var}] \quad (2.13)$$

Ztráty po kompenzaci se sníží a ušetří:

$$\Delta P_{u\dot{s}} = \Delta P - \Delta P_k = \frac{R}{U_s^2} \cdot [(P^2 + Q^2) - P^2 + (Q - Q_C)^2] \quad [W] \quad (2.14)$$

Procentní úbytek se sníží na hodnotu:

$$\Delta U_{\%} = 100 \cdot \left(1 - \frac{\cos(\varphi)}{\cos(\varphi_k)}\right) \quad [\%] \quad (2.15)$$

Poměr ztrát způsobené jalovou a činnou složkou proudu ve trojfázové soustavě:

$$\frac{\Delta P_Q}{\Delta P_p} = \frac{3 \cdot R \cdot I^2 \cdot \sin^2(\varphi)}{3 \cdot R \cdot I^2 \cdot \cos^2(\varphi)} = tg^2(\varphi) \quad (2.16)$$

Pomocí tzv. poměru ztrát způsobených jalovou složkou činného a jalového proudu můžeme upřesnit, jak moc velký vliv mají tyto složky na ztráty. Například při účinníku $\cos(\varphi) = 0,7$ jsou ztráty činné i jalové složky proudu stejné. Při $\cos(\varphi) = 0,5$ jsou ztráty jalové složky třikrát větší než činné a při $\cos(\varphi) = 0,3$ jsou ztráty jalové složky až desetkrát větší než činné. Z toho vyplývá, že čím víc se účinník vzdaluje od optimální hodnoty 0,95 - 1, tím jsou ztráty způsobené jalovou složkou větší. Proto tento typ snižování ztrát na vedení je jedno z nejekonomičtějších řešení a mnohdy také jediná možnost technického řešení. [3]

3 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ KOMPENZACE

V následující části jsou popsány technické prostředky paralelní kompenzace. Je, zde vysvětleno praktické řešení zapojení kompenzátoru do sítě, rozdělení kompenzačních prostředků, regulace a filtrace.

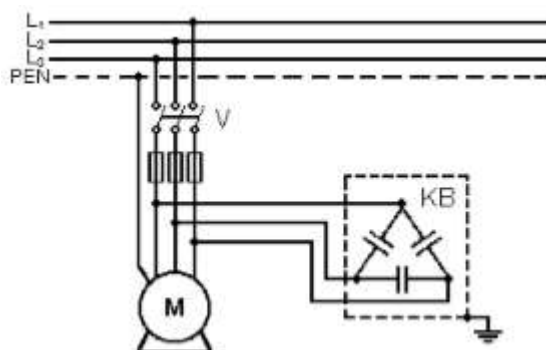
3.1 ZPŮSOB ZAPOJENÍ PARALELNÍ KOMPENZACE

Způsob připojení kompenzátoru do obvodu se spotřebičem jalového výkonu se provádí v závislosti na množství a velikosti elektrických spotřebičů, které chceme kompenzovat. Zpravidla se používá kompenzace samostatného zařízení neboli individuální kompenzace. Pokud potřebujeme kompenzovat více spotřebičů, používá se skupinová kompenzace, která kompenzuje celou skupinu. Další možností jak kompenzovat například celý průmyslový podnik je centrální nebo kombinovaná kompenzace. [2][3]

3.1.1 Individuální kompenzace:

U této kompenzace se využívají statické kondenzátory, které jsou připojeny přímo na spotřebiče jalového výkonu. Odlehčená je celá síť od spotřebiče ke zdroji, a proto jsou úspory na ztrátách nejvyšší. Z důvodu, že kondenzátor se zapíná a vypíná zároveň se spotřebičem, nejsou zapotřebí žádné spínací prvky, a zároveň nedochází k překompenzování sítě. Proto je tato kompenzace velmi přesná a jednoduchá. Další výhodou je, že kondenzátor je připojen i po vypnutí nadále ke spotřebiči, přes který se poté vybíjí. Tato kompenzace je určena pro spotřebiče vyššího a stálého výkonu, například asynchronní motory nad 5kW, transformátory a zářivková svítidla s induktivním předradníkem.

Nevýhodou této metody oproti skupinové kompenzaci je to, že ve větším množství kompenzovaných zařízení je tato kompenzace neekonomická a také fakt, že se tato kompenzace nedá regulovat, a proto, můžeme kompenzovat jen spotřebiče stálého výkonu. [2][3]

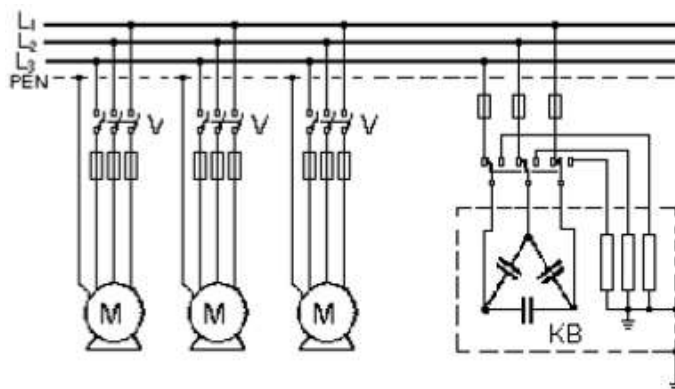


Obrázek 14: Schéma zapojení individuální kompenzace.

3.1.2 Skupinová kompenzace:

Kompenzujeme-li více spotřebičů najednou, nazýváme tuto kompenzaci skupinovou. Výhodou této kompenzace jsou menší náklady na instalovaný výkon, který je vypočten pro celou skupinu zařízení, kde je respektován činitel soudobosti spotřebičů. Z toho vyplývá, že instalovaný výkon je menší. Další výhodou této kompenzace je to, že kondenzátor nebo kompenzační baterie je připojena jen v jednom místě, většinou v rozvaděči. Z tohoto důvodu je bezpečnější a prakticky na dostupnějším místě než individuální.

Nevýhodou skupinové kompenzace je to, že kompenzujeme síť od rozvaděče, kde je kompenzační baterie po zdroj. Síť za kompenzační baterií ke spotřebiči je beze změn, a proto musí být dimenzována na plný nevykompenzovaný výkon. Další nevýhodou je fakt, že taková kompenzace musí být regulovaná. Přibudou zde další zařízení, které mohou vést k poruchám. Jsou to např. stykače, regulátor, jištění, ochranné tlumivky a vybíjecí odpory, přes které se kondenzátory po odpojení od spotřebiče vybíjí. [2][3]



Obrázek 15: Schéma zapojení skupinové kompenzace.

3.1.3 Centrální kompenzace:

Je to obdoba skupinové kompenzace s tím rozdílem, že kompenzační baterie je připojena přímo v hlavním rozvaděči, například celého průmyslového závodu, kde kompenzujeme více zařízení. Jako u skupinové kompenzace je i zde nutná regulace a instalovaný kompenzační výkon je zde také menší.

Nevýhodou této kompenzace je vysoké napětí a s tím spojená finanční náročnost na jištění. Celá rozvodná síť za kompenzační baterií směrem ke spotřebičům je rovněž nevykompenzována. [2][3]

3.1.4 Kombinovaná kompenzace:

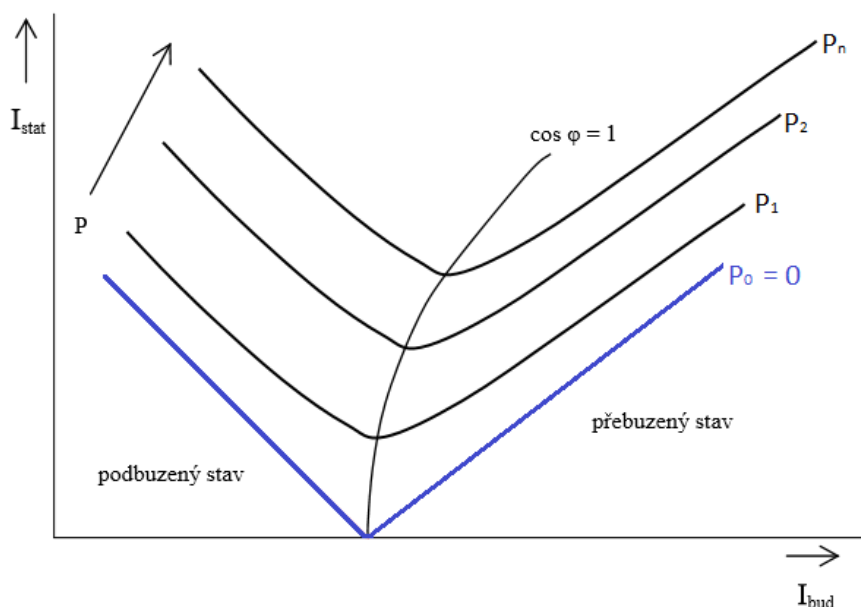
Je poměrně rozšířená metoda, která využívá kombinace předchozích metod. Nejčastěji se využívá v průmyslových sítích, kde např. velké motory se stálým zatížením kompenzujeme individuálně a u ostatních spotřebičů jalového výkonu, u kterých se mění častěji zátěž, používáme skupinovou kompenzaci. [3]

3.2 ROZDĚLENÍ KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ

3.2.1 Rotační kompenzační zařízení:

Do rotačních kompenzačních zařízení řadíme synchronní kompenzátory a synchronní motory. Všechny synchronní stroje jsou navrženy tak, že jalovou složku energie, kterou potřebují k vytvoření magnetického pole, odebírají přímo ze stejnosměrného zdroje budiče.

Pro kompenzaci synchronním motorem za předpokladu stálého zátěžného momentu platí, že měníme-li velikost budícího proudu při stálém napájecím napětí o stálém kmitočtu, činný výkon oproti jalovému je neměnný. Můžeme tedy měnit účinník motoru jak v oblasti induktivní, tak i v oblasti kapacitní. Tahle závislost proudu statoru na budícím proudu při stálém výkonu je vyznačena na obrázku [Obrázek 16] ve tvaru V-křivek, kde modře je V-křivka motoru naprázdno.



Obrázek 16: V-křivky synchronního stroje.

Synchronní kompenzátor je synchronní motor, který běží naprázdno. Vyznačuje se tím, že nemá vyvedenou hřídel. Tento motor má minimální činný výkon s velkou regulací jalového výkonu. Tento kompenzátor se využívá na hladinách vysokého napětí kolem 6kV. Není vhodná pro kompenzaci spotřebičů s dynamickými změnami jalového výkonu, a to proto, že regulace kompenzačního výkonu je s jistým zpožděním. Například když kompenzujeme spotřebič, který náhle zmenšil odebíraný jalový výkon, synchronní kompenzátor ještě po nějakou dobu dodává kompenzační výkon, což vede k překompenzování sítě a výslednému kolísání napětí.

Vzhledem k pomalejší regulaci se tyto kompenzátory používají jako centrální kompenzace velkých průmyslových sítí. [3]

3.2.2 Statické kompenzátory:

Za statické kompenzátory považujeme pasivní kompenzační prvky, jako jsou výkonové kondenzátory, kompenzační filtry či chráněná kompenzační sekce. Z ekonomických a technických důvodů jsou tyto kompenzační prostředky mnohem rozšířenější než rotační kompenzátory.[3]

3.2.2.1 Prosté kompenzátory:

Jsou to kondenzátory určené pro zlepšování účinníku ve střídavých obvodech. Tyto kondenzátory musí být pro svůj chod navrženy tak, aby dodržely tyto požadavky:

- Tepelná stabilita při vysokém jalovém výkonu.
- Odolnost proti přepětí
- Spolehlivost a bezpečnost provozu.

Pro připojení kondenzátoru na jednofázovou síť platí, že velikost jalového výkonu se rovná součinu úhlové rychlosti sítě, kapacitě kondenzátoru a čtverci napětí:

$$Q_C = U^2 \cdot \omega \cdot C \quad [\text{var}] \quad (3.1)$$

dále víme, že se rovná součinu proudu a napětí:

$$Q_C = U \cdot I \quad [\text{var}] \quad (3.2)$$

a z toho poté můžeme vyjádřit:

$$Q_C = \frac{I^2}{\omega \cdot C} \quad [\text{var}] \quad (3.3)$$

V praxi se nejčastěji setkáváme s kompenzací třífázové sítě, a to zapojené buď do hvězdy, nebo do trojúhelníku. V takovém případě potom platí **pro trojúhelník**: [3]

$$Q_C = 3 \cdot U^2 \cdot \omega \cdot C_D \quad [\text{var}] \quad (3.4)$$

dále:

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad [\text{var}] \quad (3.5)$$

a z toho poté:

$$Q_C = \frac{I^2}{\omega \cdot C_D} \quad [\text{var}] \quad (3.6)$$

Potom pro třífázové zapojení **do hvězdy** platí:

$$Q_C = 3 \cdot U^2 \cdot \omega \cdot C_Y \quad [\text{var}] \quad (3.7)$$

dále:

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad [\text{var}] \quad (3.8)$$

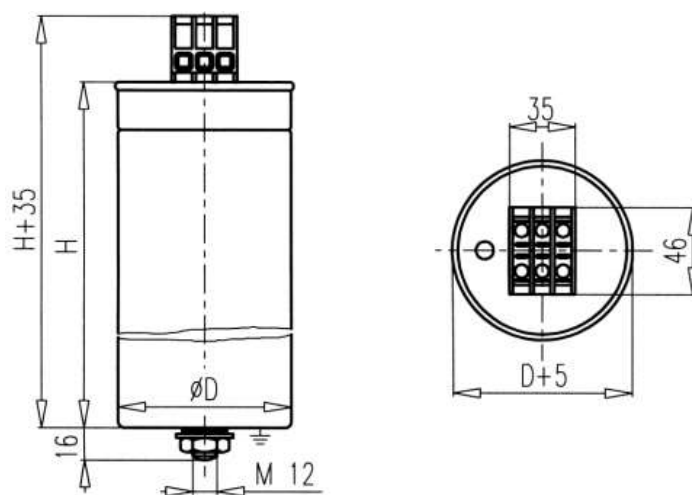
a z toho poté:

$$Q_C = \frac{3 \cdot I^2}{\omega \cdot C_Y} \quad [\text{var}] \quad (3.9)$$

Abychom mohli použít předchozí vztahy, musí platit, symetrie trojfázového zapojení. To znamená stejné hodnoty u všech kondenzátorů. Dále je patrné, že zapojení kondenzátorů do hvězdy se projevuje větším kompenzačním výkonem. [3]

3.2.2.2 Konstrukce kondenzátoru pro NN:

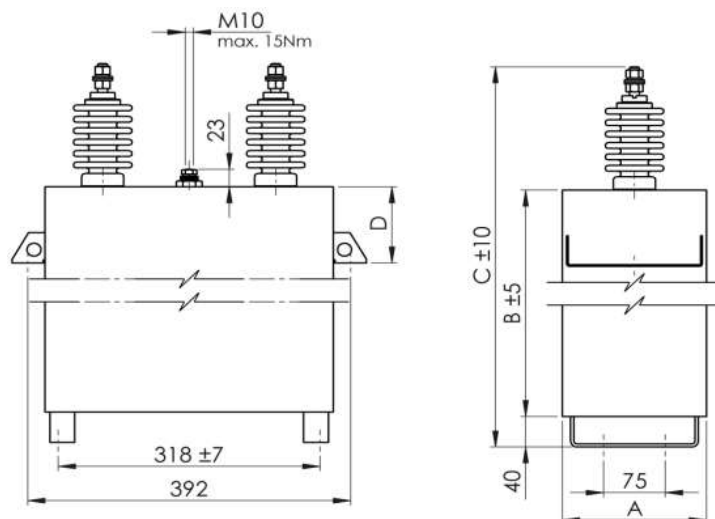
Kondenzátory jsou vyráběny systémem MPK, což je velmi suchá metoda bez oleje. Jsou tvořeny polypropylenovou fólií s nízkými dielektrickými ztrátami. Toto dielektrikum je samoregenerační. To znamená, že při průrazu dielektrika se pokovená vrstva odpaří a vznikne velmi malá plocha, která nemá vliv na další funkci kondenzátoru. Tyto kondenzátory jsou plněny pevnou kompaktní hmotou rostlinného původu, která je ekologická. Dále jsou plněny netečným a ekologickým plynem. Pro bezpečné odpojení kondenzátorů od sítě při přetížení nebo průrazu, jsou nádoby kondenzátorů vybaveny přetlakovými odpojovači. Vybíjení kondenzátorů je provedené přes paralelně řazené odpory. [6]



Obrázek 17: Kondenzátor pro NN.

3.2.2.3 Konstrukce kondenzátoru pro VN:

Pevné dielektrikum je u těchto kondenzátorů tvořené polypropylenovou impregnovanou syntetickou kapalinou, která je ekologicky nezávadná. Elektrody jsou pokryty malou vrstvou hliníkové fólie. Toto provedení konstrukce vede k malým ztrátám, které jsou podobné jako u kondenzátorů pro NN. Do těchto kondenzátorů jsou vestavěné vybíjecí odpory, které zajišťují vybití kondenzátoru pro hodnotu napětí 75 V do 10 minut. Také jsou opatřeny tlakovými odpojovači, které chrání tyto kondenzátory stejně jako u kondenzátoru pro NN. [6]



Obrázek 18: Kondenzátor pro VN.

3.3 CHRÁNĚNÁ KOMPENZACE

Další vlastností kondenzátoru je frekvenční závislost jeho impedance. To znamená, že s rostoucí frekvencí, klesá kapacitní reaktance, která je jalovou složkou impedance. Tato vlastnost je zřejmá ze vztahu pro kapacitní reaktanci kondenzátoru:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi f \cdot C} \quad [Hz] \quad (3.10)$$

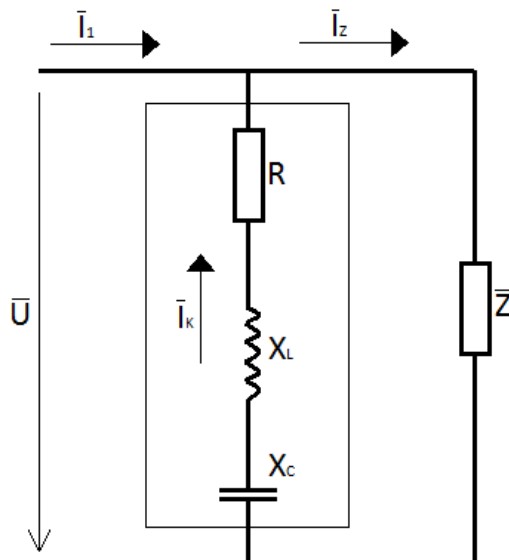
Proto, když připojíme kompenzační kondenzátor do sítě s výskytem vyšší harmonické, bude tento kondenzátor vykazovat velmi nízkou impedanci. To vede k tomu, že celková efektivní hodnota proudu protékající kondenzátorem bude narůstat a tím přetěžovat jak samostatný kondenzátor, tak i část sítě mezi kondenzátorem a zdrojem harmonické. [3][7]

Pravidlem tedy je, že v místě, kde je kondenzátor připojen samostatně k síti, nesmí nelineární zatížení překročit 10 až 15% instalovaného výkonu transformátoru. V opačném případě musí být kompenzační kondenzátory hrazeny. To znamená, že musí být připojeny přes ochrannou tlumivku, která vyfiltruje nežádoucí vyšší harmonické vzniklé nelineárními prvky.

Dále se hrazen/chráněná kompenzace využívá v sítích, kde je větší nebezpečí vzniku rezonance a to v důsledku větší velikosti kompenzační kapacity a indukčnosti některých prvků v síti. [3][7]

3.3.1 Chráněná kompenzační sekce:

Principem chráněné kompenzace je, že se do obvodu ke kompenzačním kondenzátorům připojí do série tlumivka, která vytváří společně s kondenzátorem sériový RLC obvod. Tento sériový RLC obvod tvoří takzvanou sekci, která je připojena paralelně k zátěži.

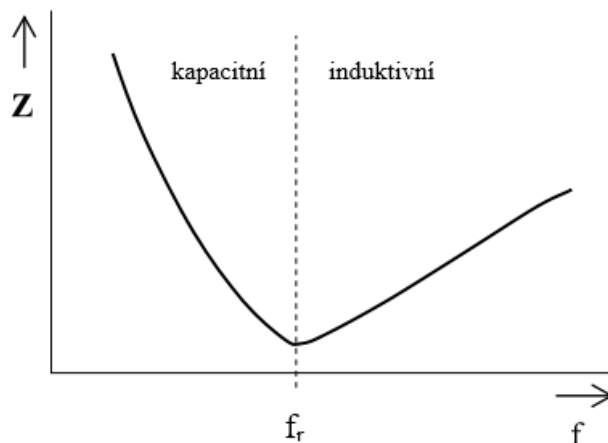


Obrázek 19: Chráněná kompenzační sekce.

Je nutné, aby rezonanční frekvence RLC obvodu f_r byla vyšší než frekvence jmenovitá a zároveň nižší než frekvence nejnižší harmonické. Pro správné zvolení této frekvence platí Thompsonova rovnice:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [Hz] \quad (3.11)$$

Toto pravidlo je zřejmé z frekvenční charakteristiky sériového rezonančního obvodu, která je znázorněna na obrázku (20). Zde je patrné, že pokud je frekvence nižší jak rezonanční, má obvod kapacitní charakter a pokud je naopak vyšší než rezonanční, má obvod induktivní charakter. [3][7]



Obrázek 20: Frekvenční charakteristika sériového rezonančního obvodu.

Pro vhodnou volbu kompenzační sekce se využívá činitel ztlumení:

$$p = \frac{1}{n_r^2} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.12)$$

Kde n_r je řád harmonické a vyjadřuje poměr mezi frekvencí rezonanční f_r a frekvencí jmenovité f_n :

$$n_r = \frac{f_r}{f_n} \quad [-] \quad (3.13)$$

Činitel ztlumení můžeme také zapsat jako poměr indukční a kapacitní reaktance:

$$p = \frac{X_L}{X_C} \quad [-] \quad (3.14)$$

Pro výpočet kapacitní reaktance kondenzátoru X_C platí vztah:

$$X_C = \frac{U_{cn}^2}{Q_c} \quad [\Omega] \quad (3.15)$$

Kde U_{cn} je jmenovité sdružené napětí štítkových hodnot kondenzátoru a Q_c je kompenzační výkon kondenzátoru.

Pro výpočet indukční reaktance tlumivky X_L platí vztah:

$$X_L = -p \cdot X_C \quad [\Omega] \quad (3.16)$$

(Ochranné tlumivky se instalují v případě, že $X_L \ll X_C$)

Následná celková reaktance celé sekce je:

$$X_{LC} = (1 - p) \cdot X_C \quad [\Omega] \quad (3.17)$$

Dále je nutno brát v úvahu, že připojením tlumivky ke kondenzátoru se zvýší i napětí, takže kondenzátory musí být dimenzovány na napětí vyšší, než je napětí sítě.

Toto napětí je dáno vztahem:

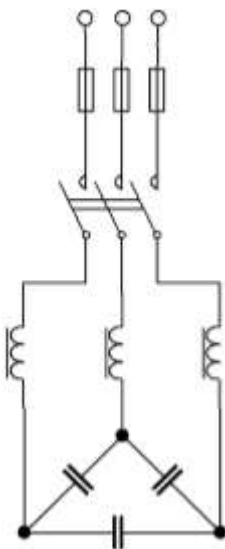
$$U_C = \frac{U_n}{1-p} \quad [V] \quad (3.18)$$

Také se změní kompenzační výkon instalovaného kondenzátoru. Důvodem je to, že kondenzátory mají štítkové hodnoty udávány při jmenovitém napětí, které již zohledňuje činitel ztlumení. Tudíž jsou tyto kondenzátory provozovány na napětí nižším, než je jmenovité, a tím se zmenší i jejich skutečný kompenzační výkon.

Toto tvrzení vyplývá ze vztahu pro instalovaný výkon sekce:

$$Q_C = \frac{U_C^2}{X_C} \quad [\text{var}] \quad (3.19)$$

Kromě toho, že se změní napětí a instalovaný výkon, je nutno také brát v potaz, že se v síti vyskytuje i signál HDO a špatným nastavením rezonančního obvodu by tento signál mohl být utlumen nebo naopak zesílena amplituda napětí. [3][7]



Obrázek 21: Chráněná kompenzační sekce.

3.3.2 Kompenzační filtry:

Princip funkce je obdobný s principem funkce ochranné kompenzační sekce, s tím rozdílem, že RLC obvod je naladěn na frekvenci harmonické, kterou filtruje. Proto se do obvodu řadí více paralelně spojených filtrů, kde každý filtr je naladěn na jinou harmonickou kterou filtruje.

Impedance tohoto filtru je:

$$\hat{Z} = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad [\Omega] \quad (3.20)$$

Kde tlumivka L a kondenzátor C tvoří reaktivní část a sériově řazený odpor R tvoří ohmickou a tedy ztrátovou složku.

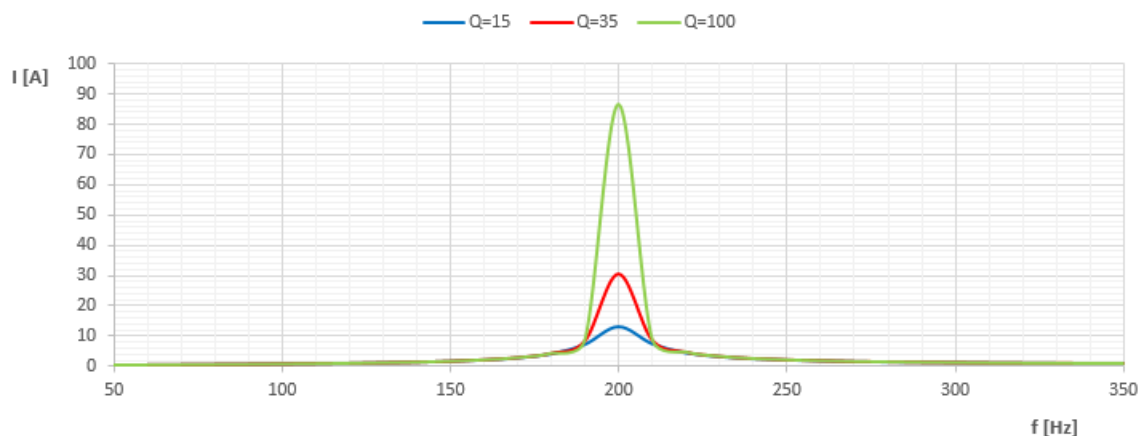
Dále činitel jakosti je dán vztahem:

$$Q = \frac{1}{\omega_r \cdot R \cdot C} = \frac{\omega_r \cdot L}{R} \quad (3.21)$$

Kde ω_r je úhlový kmitočet, který reprezentuje rezonanční frekvenci. Tato hodnota nám říká, kolikrát je větší napětí na cívce nebo kondenzátoru při rezonanční frekvenci, než napětí na odporu a než celkové napětí. [3][7]

Pokud vztáhneme proud filtru a proud při rezonanci, dostaneme vztah:

$$\frac{I}{I_R} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right)^2 \cdot Q^2}} \quad (3.22)$$



Obrázek 22: Frekvenční závislost proudu filtru.

Na obrázku (22) pro frekvenční závislost filtru je znázorněno, jak se mění proud na filtru v závislosti na kmitočtu. Je patrné, že čím je větší činitel jakosti, tím více filtr odsává rezonanční proud. Aby byla amplituda tohoto proudu co nejnižší, zvětšuje se sériový odpor, nebo se přidá do obvodu paralelní odpor k tlumivce. Při tomto zapojení je menší napěťové namáhání odporu při základní harmonické. [3][7]

3.4 ŘÍZENÁ KOMPENZACE

Aby byla kompenzace co nejúčinnější, je potřeba docílit toho, aby velikost kompenzačního výkonu odpovídala velikosti, kterou v danou chvíli potřebujeme. V případech kdy je použita skupinová nebo centrální kompenzace, se mění zatížení, a tím i potřebný kompenzační výkon. Proto je nutno tuto kompenzaci řídit neboli regulovat. [3]

3.4.1 Regulátor jalového výkonu:

Regulátory jalového výkonu slouží k automatickému řízení kompenzace. Tyto regulátory monitorují pomocí měřících transformátorů aktuální stav sítě a na základě rychlých a přesných výpočtů ovládají spínání jednotlivých kompenzačních stupňů na požadovanou hodnotu kompenzačního výkonu.

Dále jsou tyto přístroje schopny vyhodnocovat výskyt vyšších harmonických proudů a napětí a tím předejít špatnému nastavení kompenzačního výkonu nebo předejít poruchám. [6]



Obrázek 23: Regulátor jalového výkonu typu PFR6.

3.4.2 Stupňovitě řízená kompenzace:

Stupňovitě řízená kompenzace se provádí tak, že jsou postupně připojovány a odpojovány jednotlivé stupně kompenzačních baterií. Vhodnou kombinací těchto stupňů se může poměrně snadno zvýšit či snížit celkový kompenzační výkon. Důležitým faktorem je vhodně navrhnout počet stupňů a jejich velikosti. [3]

Aby byl účinník zachován co nejbližší k hodnotě $\cos(\varphi) \geq 0,95$ nebo $\tan(\varphi) \geq 0,33$, musí platit vztah:

$$\tan(\varphi) \geq \frac{Q_L - N \cdot Q_{C1}}{P} \quad (3.23)$$

Kde:

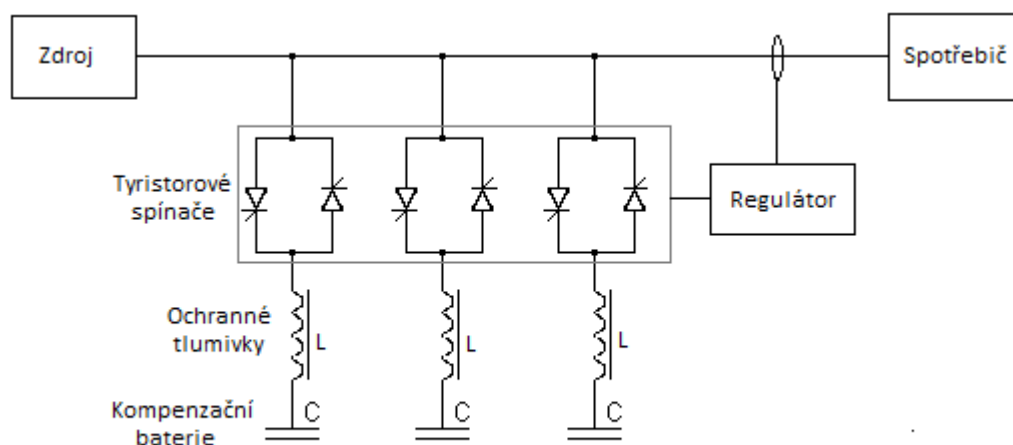
Q_L je jalový výkon zátěže při činném výkonu P ,

Q_{C1} je kompenzační výkon jednoho kompenzačního stupně,

N je počet stupňů.

Po úpravě předchozího vztahu dostaneme vyjádření pro počet stupňů kompenzátoru N :

$$N \geq \frac{Q_L - P \cdot \tan(\varphi)}{Q_{C1}} \quad (3.24)$$



Obrázek 24: Schéma zapojení stupňovité kompenzace s bezkontaktním spínačem.

3.4.2.1 *Kontaktní spínání:*

Takto spínané kompenzátory pracují tím způsobem, že kompenzátory nebo chráněné kompenzační sekce jsou připojovány přímo na síť podle pokynů regulátoru jalového výkonu.

Tyto kompenzátory jsou spínány stykači, které jsou často vybaveny předstihovými kontakty a tlumicími odpory. Předstihové kontakty slouží v první fázi k omezení špiček zapínacího proudu. Poté se přepnou a jmenovitý proud je veden přes hlavní kontakty, které se sepnou v druhé fázi a zároveň odepnou předstihové kontakty. [6]



Obrázek 25: Kompenzační stykače K3.

Kontaktní spínání má tu nevýhodu, že při nedefinovaném spínání dochází k přechodným jevům. To pak vede k proudovým rázům, které mohou narůstat až na třicetinásobnou hodnotu jmenovitého proudu. Dále zde mohou vznikat rušivé jevy, které mají vliv na napájecí síť. Tyto rušivé jevy způsobují impulsní rušení některých elektronických, měřících a výpočetních zařízení.

Kvůli těmto nevýhodám se tato možnost řízení využívá v sítích, které nemají vysoké nároky na rychlost kompenzace a tam, kde se nevyskytují vyšší harmonické složky proudu. [6]

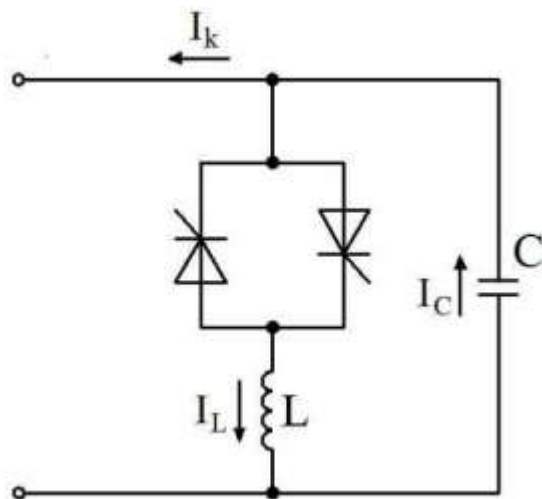
3.4.2.2 *Bezkontaktní spínání:*

Bezkontaktní spínání se využívá všude, kde jsou velké nároky na rychlou změnu kompenzačního výkonu. Rychlost spínání je zde omezena pouze rychlostí regulátorů. Tyto bezkontaktní spínače fungují na principu výkonových tyristorových spínačů.

Výhodou bezkontaktního spínání je, že umožňuje sepnutí kompenzačního stupně bez jeho vybití. To díky tomu, že tyto spínací moduly dokážou sepnout v okamžiku, kdy rozdíl napětí kondenzátoru a napětí před spínacím modulem je roven nule. Díky této funkci jsou zde omezené i rázové proudy vzniklé při spínání, které jsou zdrojem rušení či poruch. Další výhodou je, že se zvyšuje životnost jak kompenzačních baterií, tak i ochranných tlumivek. [3]

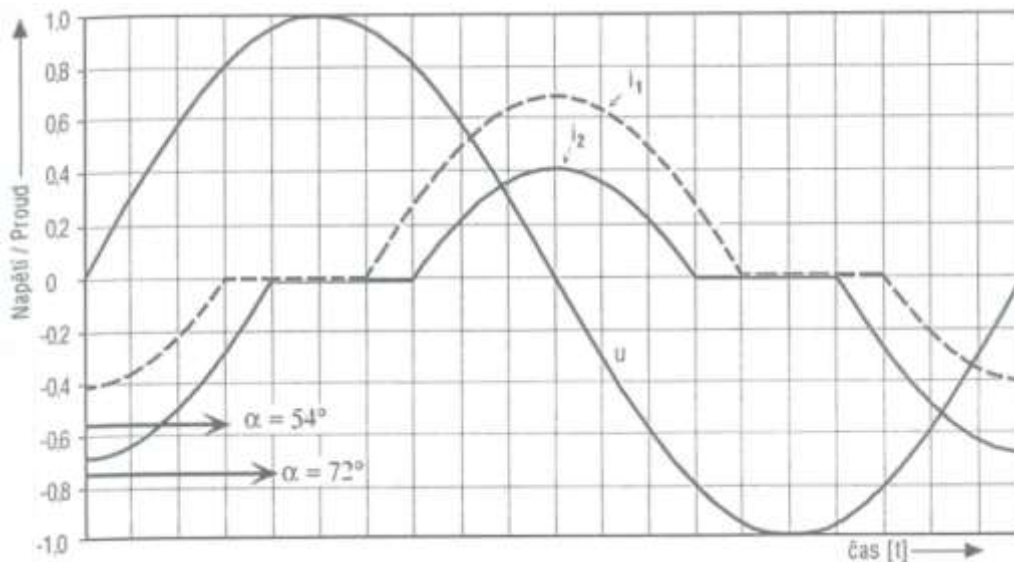
3.4.3 Plynule řízená kompenzace - Pasivní:

U tohoto typu řízené kompenzace se využívá tlumivka, která je spínaná pomocí tyristorového spínače. Řízením proudu tekoucím tlumivkou můžeme snižovat nebo zvyšovat celkový kompenzační výkon podle velikosti kompenzační baterie. Těmto tlumivkám se také říká dekompenzační tlumivky, a to proto, že mají opačnou úlohu než kondenzátory.



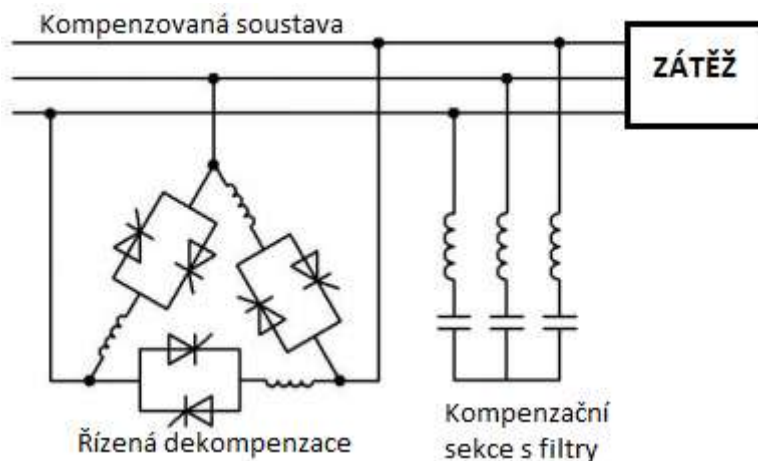
Obrázek 26: Plynulé řízený kompenzátor s dekompenzační tlumivkou.

Proud tekoucí tlumivkou můžeme řídit v rozmezí od $\pi/2$ do π . Toto pravidlo vyplývá z obrázku (25), kde je vidět, že pokud je hodnota úhlu $\alpha = \pi/2$, je induktivní proud tlumivky maximální a naopak když je hodnota úhlů $\alpha = \pi$ je tento induktivní proud nulový. [3]



Obrázek 27: Průběh fázově řízených proudů tlumivky.

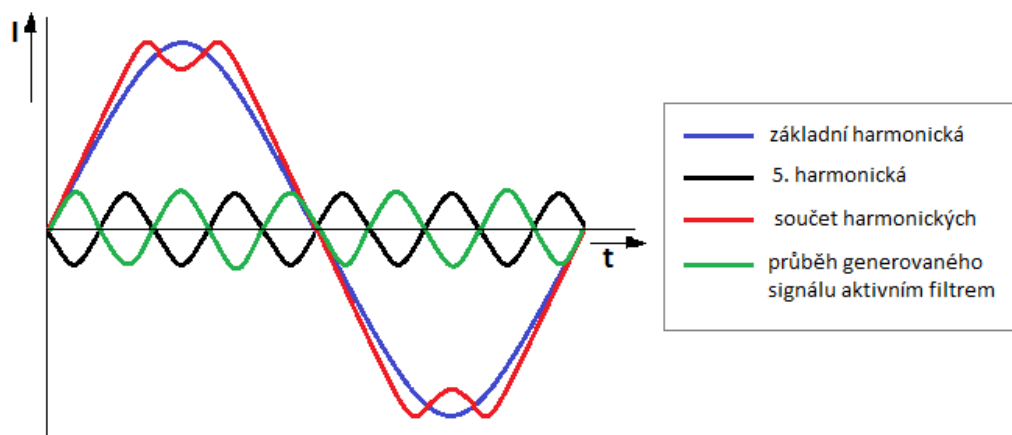
V praxi se však využívá třífázové zapojení, kde jsou dekompenzační tlumivky zapojeny do trojúhelníku. Důvodem toho, že se neuplatňuje zapojení do hvězdy, je že při tomto zapojení prochází každou fází stejný proud jako proud procházející tlumivkou a tyristorovými spínači. To vede k tomu, že se v kompenzačním obvodu, tedy i v síti objeví proudy všech harmonických složek proudu, které se vyskytují v řídicím proudu tlumivek. [3]



Obrázek 28: Plynulá kompenzace v trojfázové síti.

3.4.4 Plynule řízená kompenzace - Aktivní:

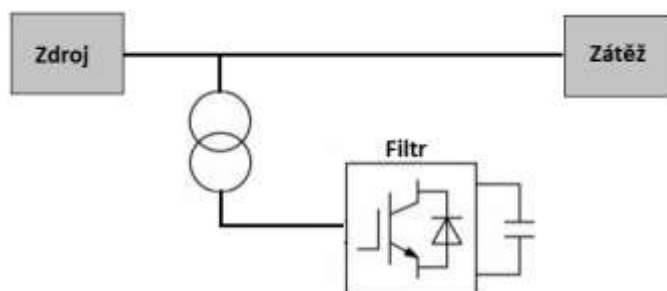
Aktivní filtry jsou paralelně nebo sériově zapojené generátory proudu, které jsou pomocí vhodných regulátorů schopny kompenzovat jak jalový výkon, tak i výskyt vyšších harmonických. Tyto filtry mohou generovat proud, napětí nebo obojí najednou. Podle toho se i dělí na paralelní, sériové nebo kombinované. Fungují tak, že generují inverzní zbytkový průběh proudu nebo napětí, který je rozdílem základní harmonické od nesinusového průběhu v síti při výskytu vyšší harmonické nebo jiného rušení. Aktivní filtry mohou tedy kromě kompenzace jalového výkonu a vyšších harmonických zlepšovat kvalitu elektrické energie i tím, že odstraňují kolísání sítě a jiné asymetrie. [3]



Obrázek 29: Generovaný signál aktivního filtru.

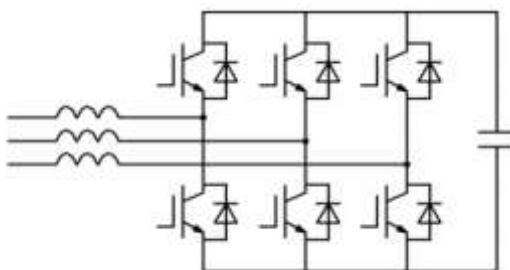
3.4.4.1 Paralelní aktivní filtry:

Tento typ filtru se skládá z generátoru proudu nebo napětí, který je připojen paralelně k síti. Tento generátor generuje stejný průběh proudu v inverzním směru, jako je výsledná křivka po odečtení základní harmonické a harmonické nesinusového průběhu. Tento průběh se vyruší s průběhem v síti a tím odstraní nežádoucí vyšší harmonické proudy a asymetrie napětí. [3]



Obrázek 30: Paralelní aktivní filtr.

Generátor proudu či napětí je tvořen můstkovým zapojením tranzistorů IGBT, které v trojfázovém provedení tvoří zapojení šesti spínačů a zdroj napětí či proudu. Toto zapojení je stejné jako můstek střídače pro řízení pohonů. Nejčastěji se využívá filtr s napěťovým zdrojem, který má k sobě připojen kondenzátor. Mezi aktivní filtr a síť se často připojuje ještě pasivní filtr z toho důvodu, že samotný aktivní filtr obsahuje velké množství harmonických ve spínací frekvenci. [4]



Obrázek 31: Měnič paralelního aktivního filtru s napěťový zdrojem.

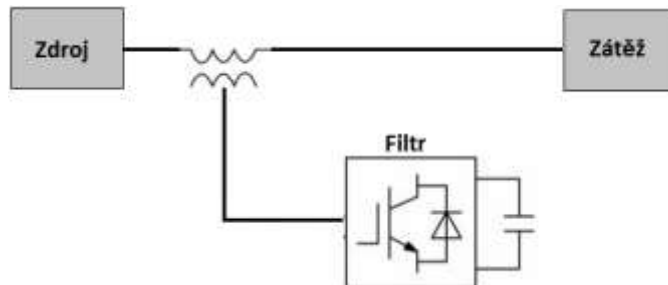
3.4.4.2 Sériové aktivní filtry:

Tento filtr se skládá z generátoru napětí, který je připojen mezi zdroj a spotřebič. Generátor tohoto filtru upravuje oproti paralelnímu zapojení hodnoty napětí. Princip tohoto filtru spočívá v tom, že je to přídavný řízený zdroj, který generuje napětí k napětí sítě. Výsledné napětí je součtem napětí sítě a sériového filtru. [3]

Tento filtr může být napájený buď přímo ze sítě, nebo vlastním nezávislým zdrojem. Při výpadku hlavního zdroje sítě proto dokáže tento filtr dodávat zátěži energii, a tím nahradit hlavní

zdroj. Dále má tento filtr schopnost udržet amplitudu napětí, kompenzovat špičky a poklesy napětí, odstraňuje harmonické složky v síti a také dokáže zajistit symetrickou.

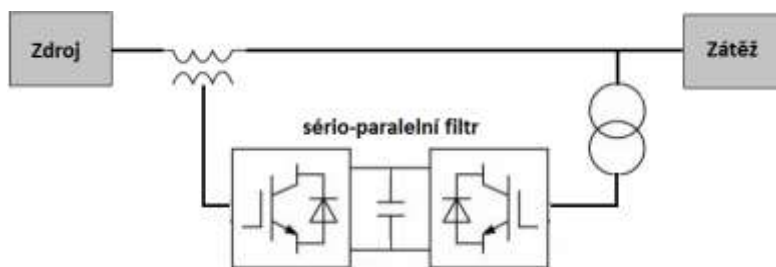
Ze zapojení sériového filtru můžeme usoudit, že upravuje celou síť od zátěže ke zdroji a má schopnost dodávat zátěži kvalitnější energii. [3]



Obrázek 32: Sériový aktivní filtr.

3.4.4.3 **Kombinované aktivní filtry:**

V tomto provedení filtru je kombinace sériového a paralelního filtru se společným řídicím členem. Výsledný filtr pak dokáže regulovat jak proudy vyšších harmonických, tak i napětí a asymetrie sítě. Tento způsob filtrace je však velmi drahý, a proto se nahrazuje filtrem paralelním s přídatným pasivním filtrem. [3]



Obrázek 33: Kombinovaný aktivní filtr.

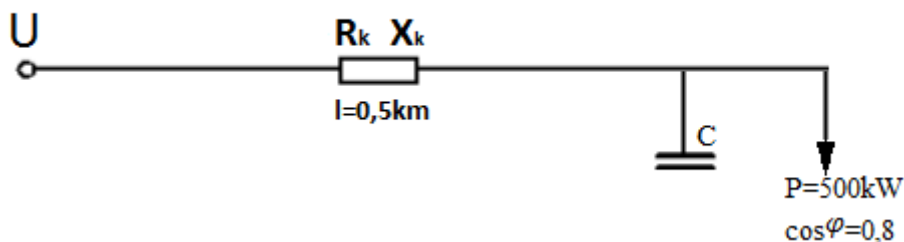
4 PŘÍKLAD VÝPOČTU KOMPENZOVANÉ SÍTĚ

V první části této kapitoly bude názorně spočítaný kompenzační výkon pro ideální účinník $\cos\varphi = 1$. Dále zde bude ukázáno, jak se změní úbytek a ztráty před a po kompenzaci.

V druhé části bude již vlastní návrh kompenzované sítě, která byla vytvořena jen pro názornou ukázkou v této bakalářské práci. Bude zde spočten potřebný kompenzační výkon a hodnoty všech technických prostředků, které jsou následně vybrány ze skutečných katalogů.

4.1 TEORETICKÁ UKÁZKA KOMPENZOVANÉ SÍTĚ

Jedná se o trojfázovou síť na hladině 6 kV s jedním odběrem. Tento odběr je vzdálený od zdroje 0,5 km. Rezistence tohoto vedení je 0,156 Ω/km a reaktance 0,33 Ω/km . Zátěží je motor o výkonu 500 kW s účinníkem $\cos\varphi = 0,8$. Úkolem této ukázky je spočítat potřebný kompenzační výkon pro účinník $\cos\varphi_k = 1$. Dále spočítat proudy, které procházejí sítí, úbytek a ztráty před a po kompenzaci. [8][11]



Obrázek 34: Teoretická ukázka kompenzované sítě.

Činný a jalový proud tekoucí zátěží:

$$I_{\xi} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_s} = \frac{500 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 48,11 \text{ A}$$

$$I_j = I_{\xi} \cdot \tan\varphi = 48,11 \cdot 0,75 = 36,08 \text{ A}$$

$$I_z = (48,11 - j36,08) \text{ A}$$

Činný a jalový proud na přívodu po kompenzaci:

$$I_{\xi} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_s} = \frac{500 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 48,11 \text{ A}$$

$$I_j = I_{\xi} \cdot \tan\varphi_k = 48,11 \cdot 0 = 0 \text{ A}$$

$$I_p = 48,11 \text{ A}$$

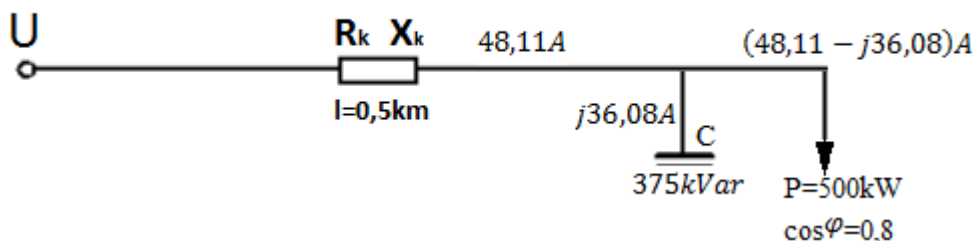
PŘÍKLAD VÝPOČTU KOMPENZOVANÉ SÍTĚ

Proud tekoucí kompenzačním kondenzátorem:

$$I_K = I_z - I_p = (48,11 - j36,08) - 48,11 = j36,08 \text{ A}$$

Kompenzační výkon:

$$Q_k = P \cdot (tg\varphi - tg\varphi_k) = 500 \cdot 10^3 \cdot (0,75 - 0) = 375 \text{ kvar}$$



Úbytek napětí a ztráty před kompenzací:

$$\Delta U_f = \sum (R_k \cdot I_{\xi} \cdot l) + \sum (X_k \cdot I_j \cdot l) = (0,156 \cdot 48,11 \cdot 0,5) + (0,33 \cdot 36,08 \cdot 0,5) = 9,71 \text{ V}$$

$$\Delta U_s = \sqrt{3} \cdot \Delta U_f = \sqrt{3} \cdot 9,71 = 16,81 \text{ V}$$

$$\Delta P = 3 \cdot R_k \cdot l \cdot I^2 = 3 \cdot R_k \cdot l \cdot (I_{\xi}^2 + I_j^2) = 3 \cdot 0,156 \cdot 0,5 \cdot (48,11^2 + 36,08^2) = 846,22 \text{ W}$$

Úbytek napětí a ztráty po kompenzací:

$$\Delta U_{fk} = \sum (R_k \cdot I_{\xi} \cdot l) + \sum (X_k \cdot I_j \cdot l) = (0,156 \cdot 48,11 \cdot 0,5) + (0,33 \cdot 0 \cdot 0,5) = 3,75 \text{ V}$$

$$\Delta U_{sk} = \sqrt{3} \cdot \Delta U_f = \sqrt{3} \cdot 3,75 = 6,5 \text{ V}$$

$$\Delta P_k = 3 \cdot R_k \cdot l \cdot I^2 = 3 \cdot R_k \cdot l \cdot (I_{\xi}^2 + I_j^2) = 3 \cdot 0,156 \cdot 0,5 \cdot (48,11^2 + 0^2) = 541,61 \text{ W}$$

Procentuální úbytek napětí a ztráty zavedením kompenzace:

$$\Delta U_{\%} = \frac{\Delta U_{sk}}{\Delta U_s} \cdot 100 = \frac{6,5}{16,81} \cdot 100 = 38,67 \%$$

$$\Delta P_{\%} = \frac{\Delta P_k}{\Delta P} \cdot 100 = \frac{541,61}{846,22} \cdot 100 = 64 \%$$

Vyhodnocení:

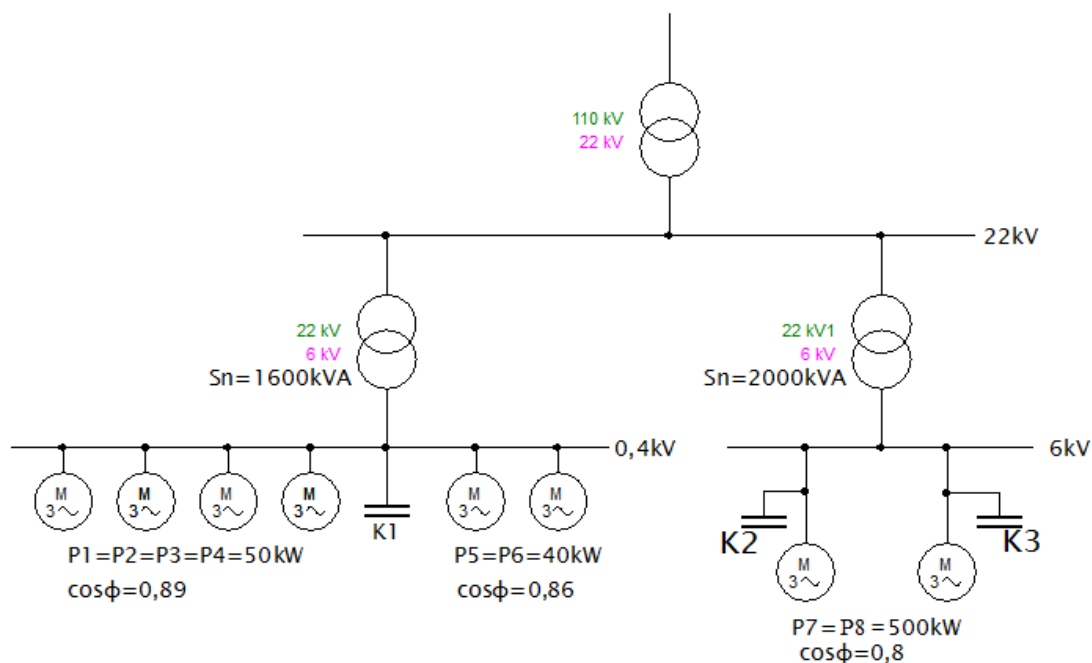
Touto názornou ukázkou je zřejmé, že při zavedení kompenzátoru o velikosti 375 kvar se zmenší úbytek napětí o 61,33 % a ztráty o 36 %. Tyto výsledky jasně ukazují, proč je kompenzace jalového výkonu důležitá, zmenšením ztrát se zmenší i náklady na provoz.[8][11]

4.2 VLASTNÍ NÁVRH KOMPENZACE

Abychom lépe pochopili kompenzaci jalového výkonu v praxi, byl vytvořen návrh sítě smyšleného průmyslového podniku.

4.2.1 Zadání:

Jedná se o průmyslovou síť s odběrem 110 kV, která je prvním transformátorem snížena na 22 kV. Tato síť se poté dělí do dvou částí, které oddělují dva transformátory 0,4 kV a 6 kV. V okruhu 6 kV jsou dva motory, které jsou již kompenzovány individuální kompenzací na účinník 0,98. V okruhu 0,4 kV je šest nových motorů, které jsou již kompenzovány individuální kompenzací na účinník 0,98. V okruhu 0,4 kV je šest nových motorů, které se dělí na dva motory o výkonu 40 kW s účinníkem 0,86 a 4 motory s výkonem 50 kW a účinníkem 0,89. Dále jsou tyto motory řízeny frekvenčním měničem.[8][9]



Obrázek 35: Kompenzovaná síť.

4.2.2 Návrh kompenzace pro okruh 0,4 kV:

V okruhu na napětové hladině 0,4 kV bude navržena nová kompenzace. Snahou nové kompenzace je zlepšit účinník na $\cos\varphi = 0,98$.

Motory připojené v tomto okruhu mohou být v provozu všechny současně nebo každý motor zvlášť v jiný časový okamžik, proto bude navržena skupinová kompenzace.

Dále z důvodu výskytu 5 a 7 harmonické, které generují frekvenční měniče s napětovým meziobvodem budou tyto kompenzace hrazené, aby eliminovaly vznik rezonančních jevů ohrožujících jak vlastní spotřebiče a kompenzační zařízení, tak i další prvky elektrické sítě. Pro

návrh hrazené kompenzace je nutnost mít dobře zvolený činitel ztlumení p . Tento činitel se volí s ohledem na nejnižší harmonickou a frekvenci, na které je vysílán signál HDO. Pro tento případ je nejnižší 5. harmonická a signál HDO se vysílá na frekvenci 216 2/3 Hz. Z tohoto důvodu je zvolen činitel ztlumení pro hodnotu $p = 7 \%$. [8]

4.2.2.1 Určení kompenzačního výkonu:

Součet výkonu motoru s 50 kW:

$$P_{1234} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 50 + 50 + 50 + 50 = 200 \text{ kW}$$

$$\cos\varphi = 0,89$$

$$S_{1234} = \frac{P_{1234}}{\cos\varphi} = \frac{200}{0,89} = 224,72 \text{ kVA}$$

$$Q_{1234} = \sqrt{S_{1234}^2 - P_{1234}^2} = \sqrt{224,72^2 - 200^2} = 102,47 \text{ kvar}$$

Součet výkonu motoru s 40 kW:

$$P_{56} = P_5 + P_6 = 40 + 40 = 80 \text{ kW}$$

$$\cos\varphi = 0,86$$

$$S_{56} = \frac{P_{56}}{\cos\varphi} = \frac{80}{0,86} = 93,02 \text{ kVA}$$

$$Q_{56} = \sqrt{S_{56}^2 - P_{56}^2} = \sqrt{93,02^2 - 80^2} = 47,46 \text{ kvar}$$

Celkový výkon všech motorů:

$$P = P_{1234} + P_{56} = 200 + 80 = 280 \text{ kW}$$

$$Q = Q_{1234} + Q_{56} = 102,47 + 47,46 = 149,93 \text{ kvar}$$

Kompenzační výkon pro hodnotu účinníku $\cos\varphi = 0,98$

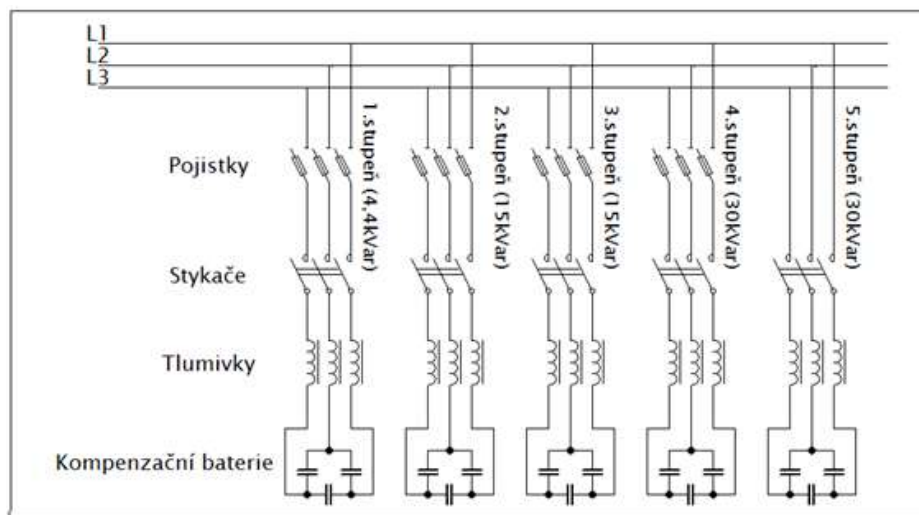
$$S_K = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{280}{0,98} = 285,7 \text{ VA}$$

$$Q_K = \sqrt{S_K^2 - P^2} = \sqrt{285,7^2 - 280^2} = 56,78 \text{ kvar}$$

$$Q_{komp} = Q - Q_K = 149,93 - 56,78 \doteq 93 \text{ kvar}$$

PŘÍKLAD VÝPOČTU KOMPENZOVANÉ SÍTĚ

Z výpočtů je zřejmé, že aby byl účinník po kompenzaci na hodnotě $\cos\varphi = 0,98$, musí se navrhnout kompenzační sekce s celkovým výkonem 93 kvar. Tento kompenzační výkon bude rozdělen do pěti stupňů s celkovým výkonem 4,4 kvar, 2x15 kvar, 2x30 kvar. [8][9]



Obrázek 36: Kompenzační rozvaděč.

4.2.2.2 Výběr vhodných kondenzátorů pro sekci 15 kvar:

Z důvodu, že tato kompenzace je hrazená, musíme přepočítat napětí, na které jsou kondenzátory dimenzovány.

$$U_c = \frac{U_s}{1 - p} = \frac{400}{1 - 0,07} = 430 \text{ V}$$

Z výpočtu je vidět, že napětí vlivem tlumivky vzroste na 430 V a proto se musí vybírat kondenzátory dimenzovány na tuto napěťovou hladinu.

Dále se musí spočítat proud, který poteče kondenzátorem:

$$I = \frac{Q_c}{\sqrt{3} \cdot U_s} = \frac{15000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 21,65 \text{ A}$$

Ze znalostí napětí U_c a proudu I bude vypočtena, kapacita kondenzátoru C . Všechny kondenzátory budou zapojeny do trojúhelníku, proto se při výpočtu kapacity musí brát v úvahu, že proud při zapojení do trojúhelníku bude o $\sqrt{3}$ krát menší než proud fázový: [4][8]

$$C = \frac{\frac{I}{\sqrt{3}}}{U_c \cdot 2\pi f} = \frac{\frac{21,65}{\sqrt{3}}}{430 \cdot 2\pi \cdot 50} = 92,5 \text{ } \mu\text{F}$$

PŘÍKLAD VÝPOČTU KOMPENZOVANÉ SÍTĚ

Pomocí všech předchozích vypočtených údajů bude vybrán vhodný kondenzátor z katalogu. Nejvhodnějším typu kondenzátoru pro tuto sekci odpovídá kondenzátor od firmy VISHAY. Z katalogu v tabulce 4.1 byl vybrán kondenzátor s výkonem 16,9 kvar dimenzovaný na napětí 440 V. Tento výkon je vyšší než je potřebný, ale celkový výkon sekce, se vlivem hrazení kompenzace zmenší. Pro ověření zda vyhovuje i výkon celé sekce musíme přepočítat skutečný výkon celé sekce, kde je zapojen kondenzátor s tlumivkou v sérii:

$$Q_{CL} = \frac{U_s^2}{(1-p) \cdot \left(\frac{U_{cn}^2}{Q_n}\right)} = \frac{400^2}{(1-0,07) \cdot \left(\frac{440^2}{16900}\right)} = 15,02 \text{ kvar}$$

Kde:

U_s je sdružené napětí kompenzované sítě,

U_{cn} je jmenovité napětí kondenzátoru,

Q_n je jmenovitý výkon kondenzátoru,

Stejnou metodou jsou vypočteny i kondenzátory dalších sekcí a podle těchto údajů byly vybrány kondenzátory z tabulky 4.1.

Tabulka 2: Katalog výrobce kompenzačních kondenzátorů VISHAY

RATED VOLTAGE 440 V, 50 Hz, DELTA CONNECTION, UL / ULC								
CAN BE USED ALSO FOR 415 V								
	TYPE	ARTICLE NO. (1)	OUTPUT kvar 440 V	OUTPUT kvar 415 V	CAP. µF	CURRENT A 440 V / 415 V	DIMENSIONS Ø x H mm	WEIGHT kg
	PhMKP440.3.02,50-A64	5341-48322-xx	2.5	2.2	3 x 13.7	3.3 / 3.1	64 x 190	0.7
1. stupeň	PhMKP440.3.05,00-A64	5341-48309-xx	5	4.4	3 x 27.4	6.6 / 6.1	64 x 190	0.8
	PhMKP440.3.08,33-A64	5341-48310-xx	8.33	7.4	3 x 45.7	10.9 / 10.3	64 x 190	0.8
	PhMKP440.3.10,00-A64	5341-48311-xx	10	8.9	3 x 54.8	13.1 / 12.4	64 x 265	1.0
	PhMKP440.3.11,20-A64	5341-48312-xx	11.2	10	3 x 61.4	14.7 / 13.9	64 x 265	1.0
	PhMKP440.3.12,50-A84	5341-48609-xx	12.5	11.1	3 x 68.5	16.4 / 15.5	84.4 x 190	1.3
	PhMKP440.3.14,10-A84	5341-48610-xx	14.1	12.5	3 x 77.0	18.5 / 17.5	84.4 x 190	1.3
	PhMKP440.3.15,00-A84	5341-48611-xx	15	13.3	3 x 82.2	19.7 / 18.6	84.4 x 190	1.3
2,3. stupeň	PhMKP440.3.16,90-A84	5341-48612-xx	16.9	15	3 x 92.6	22.2 / 20.9	84.4 x 190	1.3
	PhMKP440.3.18,80-A84	5341-48613-xx	18.8	16.67	3 x 103.0	24.7 / 23.3	84.4 x 265	1.7
	PhMKP440.3.20,00-A84	5341-48614-xx	20	17.8	3 x 109.6	26.2 / 24.8	84.4 x 265	1.7
	PhMKP440.3.22,50-A84	5341-48615-xx	22.5	20	3 x 123.3	29.5 / 27.8	84.4 x 265	1.7
	PhMKP440.3.25,00-A84	5341-48616-xx	25	22.2	3 x 137.0	32.8 / 30.9	84.4 x 265	1.7
	PhMKP440.3.28,10-A84	5341-48617-xx	28.1	25	3 x 154.0	36.9 / 34.8	84.4 x 265	1.7
	PhMKP440.3.30,00-A84	5341-48618-xx	30	26.7	3 x 164.4	39.4 / 37.1	84.4 x 340	2.1
4,5. stupeň	PhMKP440.3.33,00-B136	5341-47602-xx	33	29.4	3 x 180.9	43.3 / 40.9	136 x 190	2.3

4.2.2.3 Výběr vhodné tlumivky pro sekci 15 kvar:



Obrázek 37: Ochranná tlumivka.

Nejprve je nutné spočítat kapacitní reaktanci kondenzátoru:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 3 \cdot 92,6 \cdot 10^{-6}} = 11,46 \, \Omega$$

Ze znalostí kapacitní reaktance kondenzátoru a činitele ztlumení se vypočte indukivní reaktance ochranné tlumivky:

$$X_L = X_c \cdot p = 11,46 \cdot 0,07 = 0,8 \, \Omega$$

Dále se spočte indukčnost tlumivky a proud celé sekce:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{0,8}{2\pi \cdot 50} = 2,55 \, \text{mH}$$

$$I_{CL} = \frac{Q_{CL}}{\sqrt{3} \cdot U_s} = \frac{15020}{\sqrt{3} \cdot 400} = 21,68 \, \text{A}$$

Z vypočtených hodnot, se může určit vhodná tlumivka pro tuto sekci. Jelikož nebyla nalezena tlumivka, která odpovídá hodnotě indukčnosti a proudu, musí být tato tlumivka vyrobena na zakázku, což povede ke zvýšení nákladů. Toto platí pro tlumivky u všech sekcí. Všechny hodnoty pro výběr tlumivky jsou zapsány v tabulce 4.2.[4][8]

Tabulka 3: Vypočtené hodnoty pro návrh tlumivek.

Kompenzační stupeň	Výkon celé sekce Q_{CL}	Proud celé sekce I	Indukčnost tlumivky L
	[kVar]	[A]	[mH]
1. stupeň	4,4	6,35	8,62
2,3. stupeň	15,02	21,68	2,55
4,5. stupeň	29,3	42,3	1,31

4.2.2.4 Výběr vhodného regulátoru:

Pro řízení sepnutí stykačů byl vybrán regulátor **Super PFR 6/12** od firmy **ZES-SILKO**. Tento regulátor je plně automatický, monitoruje stav v rozvodné síti včetně harmonických složek. Pomocí přesných a rychlých výpočtů připojuje nebo odpojuje jednotlivé kompenzační stupně pro dosažení požadovaného $\cos \varphi$. Tento regulátor může spínat 6/12 stupňů. [6]



Obrázek 38: Regulátor jalového výkonu Super PFR 6/12.

Parametry přístroje:

- Napájecí a měřicí napětí: 400 VAC (+15/–10%), 50/60 Hz
- Vstup měřicího proudu: transformátor, IN / 5
- Rozsah měření proudu: 0,05 - 5 A
- Přesnost měření napětí: 1%
- Přesnost měření proudu: 1%
- Přesnost měření $\cos \varphi$: 2%
- Displej: 3- řádkový
- Výstup: relé, max. 250 V, 4 A, AC1
- Stupeň krytí: IP 40
- Rozměry: 144 x 144 x 62 mm

Hlavní výhody:

- Automatické nebo ruční nastavení
- měření THDU a THDI
- měření harmonických 3,5,7,9,11,13
- měření teploty
- chybová hlášení (alarm)
- měření $\cos \varphi$ s použitím skutečných hodnot RMS napětí a proudu
- programování parametrů za provozu
- plně digitální programovací a ovládací prvky

4.2.2.5 *Výběr Stykačů:*

Stykače pro spínání kompenzačních stupňů jsou vybrány ze stejné firmy jako regulátory, a tedy ZES-SILKO. Byly vybrány stykače NN typu K3-K..., které jsou určené pro spínání jak induktivních, tak kapacitních baterií bez a s ochrannými tlumivkami. Tyto stykače jsou vybaveny předstihovými kontakty a tlumícími odpory, které redukují špičky zapínacího proudu na $< 70 \times I_e$. Jsou odolné proti spékání kontaktů pro výhledový zapínací špičkový proud $200 \times I_e$. Pojistky gL(gG) pro ochranu jednotlivých sekcí je třeba stanovit na $1,6$ až $2,5 \times I_e$.

Pro výběr správného typu stykače z katalogu je zapotřebí znát parametry dané sekce (Jmenovité napětí, spínaný výkon a proud). Například pro **1. stupeň**, který má spínaný výkon 4,4 kvar, napětí 440 V a proud 6,35 A byl z katalogu v tabulce 4.3 vybrán **stykač K3-18K**. Stykače pro ostatní sekce byly vybrány podle parametrů daných sekcí a byly zaznačeny do tabulky 4.3. [6][8]

Tabulka 4: Katalog stykačů typu K3-K...

	380 V 400 V [kvar]	50 °C 415 V 440 V [kvar]	660 V 690 V [kvar]	380 V 400 V [kvar]	60 °C 415 V 440 V [kvar]	660 V 690 V [kvar]	rozp. kont. NO	spín. kont. NC	příslu- šenství [ks]	Typ s cívkou 220-240 V 50 Hz	Balení [ks]	Hmotn. [kg/ks]
	12,5	13	20	12,5	13	20	1	-	1 1)	K3-18K10230	1	0,34
1. stupeň	12,5	13	20	12,5	13	20	-	-	1 1)	K3-18K01230	1	0,34
2,3. stupeň	20	22	33	20	22	33	-	-	1 1)	K3-24K00230	1	0,62
	25	27	41	25	27	41	-	-	3 2)	K3-32K00230	1	0,62
4,5. stupeň	33,3	36	55	33,3	36	55	-	-	3 2)	K3-50K00230	1	1,0
	50	53	82	50	53	82	-	-	3 2)	K3-62K00230	1	1,0
	75 3)	75 3)	120 3)	60 3)	64 3)	100 3)	-	-	3 2)	K3-74K00230	1	1,0
									3 2)			

Tabulka 5: Parametry katalogových stykačů K3-K...

Typ		K3-18K	K3-24K	K3-32K	K3-50K	K3-62K	K3-74K
Četnost spínání	1/h	240	240	240	120	120	80
Životnost spínače	$S \times 10^6$	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,08
Jmenovitý proud I_e	při 50 °C [A]	18	28	35	48	72	105
	při 60 °C [A]	18	28	35	48	72	87
Pojistky gL(gG)	od/do [A]	35/63	50/80	63/100	80/160	125/160	160/200

4.2.2.6 *Výběr pojistkových vložek a odpínačů:*

Velikost proudu pro pojistkové vložky jsou již dány v předchozí tabulce 4.4, kde jsou vidět mimo parametrů stykačů i velikosti proudu doporučených pojistek. Například u 1. stupně, kde byl vybrán stykač K3-18K je doporučená velikost proudu pojistek mezi 35-63 A. Pro tento stupeň byly tedy vybrány tři nožové pojistkové vložky typu PNA1 35A Gg z katalogu v tabulce pro pojistkové vložky 4.5 od českého výrobce OEZ s.r.o., kde jsou označeny i ostatní pojistkové vložky. Je důležité brát v úvahu, že pro každou sekci je nutno zakoupit tři stejné pojistkové vložky. [8][11]

Tabulka 6: Katalog pojistkových vložek PNA1.

I _n [A]	Charakteristika gG				Charakteristika aM				Balení [ks]
	Typ	Objednáací kód	Ztráty [W]	Hmotnost [kg]	Typ	Objednáací kód	Ztráty [W]	Hmotnost [kg]	
16	PNA1 16A gG	OEZ:40428	2,10	0,30	-	-	-	-	3
20	PNA1 20A gG	OEZ:40429	2,72	0,30	-	-	-	-	3
25	PNA1 25A gG	OEZ:40430	2,80	0,30	-	-	-	-	3
32	PNA1 32A gG	OEZ:40431	3,40	0,30	-	-	-	-	3
35	PNA1 35A gG	OEZ:40432	3,20	0,30	-	-	-	-	3
40	PNA1 40A gG	OEZ:40433	4,65	0,30	-	-	-	-	3
50	PNA1 50A gG	OEZ:40434	4,62	0,30	-	-	-	-	3
63	PNA1 63A gG	OEZ:40435	6,00	0,30	PNA1 63A aM	OEZ:40443	4,0	0,30	3
80	PNA1 80A gG	OEZ:40436	7,50	0,30	PNA1 80A aM	OEZ:40444	4,9	0,30	3
100	PNA1 100A gG	OEZ:40437	8,45	0,30	PNA1 100A aM	OEZ:40445	5,8	0,44	3
125	PNA1 125A gG	OEZ:40438	10,70	0,30	PNA1 125A aM	OEZ:40446	8,1	0,44	3
160	PNA1 160A gG	OEZ:40439	14,60	0,30	PNA1 160A aM	OEZ:40447	11,4	0,44	3
200	PNA1 200A gG	OEZ:40440	15,00	0,44	PNA1 200A aM	OEZ:40448	14,1	0,44	3
224	PNA1 224A gG	OEZ:40441	16,10	0,44	-	-	-	-	3
250	PNA1 250A gG	OEZ:40442	18,20	0,44	PNA1 250A aM	OEZ:40449	18,0	0,44	3

Dále je nutné vybrat vhodné pojistkové odpínače, které odpovídají velikosti spodků pojistkových vložek. Z tabulky 4.6 bylo vybráno 5 stejných pojistkových odpínačů typu FH1-3A/F s velikosti spodků 1.

Tabulka 7: Katalog pojistkových odpínačů typu FH1-3A/F

I _n [A]	Počet pólů	Typ	Objednáací kód	Hmotnost [kg]	Balení [ks]
250	1	FH1-1A/F	OEZ:14362	1,164	1
	3	FH1-3A/F	OEZ:14364	2,786	1
400	1	FH2-1A/F	OEZ:14369	1,280	1
	3	FH2-3A/F	OEZ:14368	2,980	1
630	1	FH3-1A/F	OEZ:14374	1,710	1
	3	FH3-3A/F	OEZ:14373	4,992	1

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit se s teorií a technickými prostředky kompenzace jalové energie. Dále bylo úlohou vytvořit názornou ukázkou teoretického výpočtu a vlastního návrhu skupinové kompenzace.

V kapitole 4.1 je vypočten teoretický příklad pro ideální kompenzaci jalové energie. Ideální je myšleno to, že účinník je vykompenzován na hodnotu $\cos\varphi = 1$. Jedná se o síť s jedním odběrem o výkonu 500 kW s účinníkem $\cos\varphi = 0,8$, která se bude kompenzovat individuálně. Při teoretickém výpočtu byly vypočteny proudy procházející sítí a potřebný kompenzační výkon, který je roven 375 kvar. Následně byly srovnány změny před kompenzací a po kompenzací, kdy se úbytek napětí zavedením kompenzace snížil o 61,33 % a ztráty se snížily o 36 %. Takové výsledky jasně poukazují proč je kompenzace jalové energie důležitou součástí všech sítí s velkým odběrem jalové energie.

Poslední kapitola 4.2 se již věnuje vlastnímu návrhu skupinové kompenzace pro smyšlenou průmyslovou síť se šesti motory. Nejprve byl vypočten potřebný kompenzační výkon 93 kvar pro kompenzaci účinníku na hodnotu $\cos\varphi = 0,98$. Následně byl vytvořen návrh kompenzačního rozvaděče, kde byl kompenzační výkon rozdělen do pěti chráněných sekcí. V praxi se pro návrh sekcí provádí několik měření, aby byly sekce navrženy s největší efektivitou pro každý možný případ zatížení. Jelikož se jedná o smyšlenou průmyslovou síť, byly sekce navrženy tak aby byla maximální efektivita kompenzace u jednoho nebo všech motorů. Dále byly vypočteny u každé sekce potřebné parametry pro výběr kompenzačních baterií, ochranných tlumivek, stykačů a pojistek, které byly následně vybrány z katalogů výrobců kompenzačních prostředků. Problém nastal jen u ochranných tlumivek, které nebyly nalezeny u žádného výrobce tak, aby se zachovaly vypočtené parametry. Proto by v případě skutečného návrhu musely být tyto tlumivky vyrobeny na zakázku, což by vedlo k větší ekonomické náročnosti tohoto projektu.

Kompenzace jalové energie je a nadále i bude důležitou součástí pro většinu průmyslových odběratelů, kteří se budou chtít vyhnout pokutám a cenovým přírůzkám za elektrickou energii. Problematikou kompenzace jalové energie se také i nadále budou zabývat distributoři elektrické energie, kteří řeší především technické důvody, ale s tím spojené i ekonomické důvody. Jedná se především o ztráty na vedení a špatné využití výkonu transformátorů. Kompenzace jalové energie se v budoucnu bude ubírat moderním směrem, protože bude využívat více elektronických součástí spojené s rychlou a přesnou regulací kompenzačního výkonu nehledě na kvalitu elektrické energie.

Použitá literatura

- [1] Moderní učebnice elektroniky: Základy elektroniky, ideální a reálné prvky. 2005. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-730-0146-2.
- [2] HRADÍLEK, Zdeněk. Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení. Ostrava: Vydala VŠB-TU Ostrava ve vydavatelství Montanex, 2008. ISBN 978-80-7225-291-6.
- [3] KORENC, Vladimír a Jiří HOLOUBEK. Kompenzace jalového výkonu v praxi. Vyd. 1. Praha: IN-EL, 1999. Knižnice Elektro. ISBN 80-862-3007-4.
- [4] Základy kompenzace. Kompenzace jalového výkonu [online]. [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: <http://www.kbh.cz/kompenzace/zaklady-kompenzace>
- [5] PETRŮ, Ctibor a Vladimír KORENC. Problematika aktivních filtrů pro velké výkony. Elektro [online]. [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/problematika-aktivnich-filtru-pro-velke-vykony--15127>
- [6] Výrobce kompenzační techniky: ZES-SILKO Power Capacitors [online]. [cit. 2016-03-22]. Dostupné z: <http://www.zez-silko.cz/>
- [7] LAKOMÝ, Marek. Moderní prostředky paralelní kompenzace. Brno, 2012. Bakalářská práce. VUT-Brno, FEKT, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.
- [8] POSPÍŠIL, Zdeněk. Kompenzace jalového výkonu průmyslového odběratele. Brno, 2013. Bakalářská práce. VUT-Brno, FEKT, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
- [9] KOTĚŠOVEC, Ladislav. Technické a ekonomické posouzení variant skupinové a centrální kompenzace. Brno, 2012. Diplomová práce. VUT-Brno, FEKT, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
- [10] Energetický regulační věstník.: Energetický regulační úřad. 2013 [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/pece-a-podpora/cenove-rozhodnuti-5-2013.pdf>
- [11] Výrobce jistících prvků. OEZ [online]. [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://www.oez.cz/>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Rezistor ve střídavém obvodu.....	- 12 -
Obrázek 2: Fázorový diagram a průběh napětí, proudu a výkonu ohmické zátěže.....	- 12 -
Obrázek 3: Kondenzátor ve střídavém obvodu.....	- 13 -
Obrázek 4: Fázorový diagram a průběh napětí, proudu a výkonu kapacitní zátěže.....	- 13 -
Obrázek 5: Cívka ve střídavém obvodu.....	- 14 -
Obrázek 6: Fázorový diagram a průběh napětí, proudu a výkonu kapacitní zátěže.....	- 14 -
Obrázek 7: Trojúhelník výkonů.....	- 16 -
Obrázek 8: Zdánlivý výkon v obvodech s vyššími harmonickými.....	- 17 -
Obrázek 9: Fázorový diagram před a po kompenzaci.....	- 22 -
Obrázek 10: Schéma zapojení sériové kompenzace do střídavé sítě.....	- 23 -
Obrázek 11: Fázorový diagram sériové kompenzace.....	- 23 -
Obrázek 12: Schéma zapojení paralelní kompenzace do střídavé sítě.....	- 24 -
Obrázek 13: Fázorový diagram paralelní kompenzace.....	- 24 -
Obrázek 14: Schéma zapojení individuální kompenzace.....	- 26 -
Obrázek 15: Schéma zapojení skupinové kompenzace.....	- 27 -
Obrázek 16: V-křivky synchronního stroje.....	- 28 -
Obrázek 17: Kondenzátor pro NN.....	- 30 -
Obrázek 18: Kondenzátor pro VN.....	- 31 -
Obrázek 19: Chráněná kompenzační sekce.....	- 32 -
Obrázek 20: Frekvenční charakteristika sériového rezonančního obvodu.....	- 33 -
Obrázek 21: Chráněná kompenzační sekce.....	- 34 -
Obrázek 22: Frekvenční závislost proudu filtru.....	- 35 -
Obrázek 23: Regulátor jalového výkonu typu PFR6.....	- 36 -
Obrázek 24: Schéma zapojení stupňovité kompenzace s bezkontaktním spínačem.....	- 37 -
Obrázek 25: Kompenzační stykače K3.....	- 38 -
Obrázek 26: Plynulé řízený kompenzátor s dekompenzační tlumivkou.....	- 39 -
Obrázek 27: Průběh fázově řízených proudů tlumivky.....	- 39 -
Obrázek 28: Plynulá kompenzace v trojfázové síti.....	- 40 -
Obrázek 29: Generovaný signál aktivního filtru.....	- 40 -
Obrázek 30: Paralelní aktivní filtr.....	- 41 -
Obrázek 31: Měníč paralelního aktivního filtru s napěťový zdrojem.....	- 41 -
Obrázek 32: Sériový aktivní filtr.....	- 42 -
Obrázek 33: Kombinovaný aktivní filtr.....	- 42 -
Obrázek 34: Teoretická ukázka kompenzované sítě.....	- 43 -
Obrázek 35: Kompenzovaná síť.....	- 45 -
Obrázek 36: Kompenzační rozvaděč.....	- 47 -
Obrázek 37: Ochranná tlumivka.....	- 49 -
Obrázek 38: Regulátor jalového výkonu Super PFR 6/12.....	- 50 -

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Cenové přírážky za nedodržení předepsané úrovně $\cos \varphi$:</i>	<i>- 20 -</i>
<i>Tabulka 2: Katalog výrobce kompenzačních kondenzátoru VISHAY</i>	<i>- 48 -</i>
<i>Tabulka 3: Vypočtené hodnoty pro návrh tlumivek</i>	<i>- 49 -</i>
<i>Tabulka 4: Katalog stykačů typu K3-K</i>	<i>- 51 -</i>
<i>Tabulka 5: Parametry katalogových stykačů K3-K</i>	<i>- 51 -</i>
<i>Tabulka 6: Katalog pojistkových vložek PNA1</i>	<i>- 52 -</i>
<i>Tabulka 7: Katalog pojistkových odpínačů typu FHI-3A/F</i>	<i>- 52 -</i>